TURING 图灵新知

Cosmic Numbers:
The Numbers That Define Our Universe

揭示宇宙奥秘的13个常数

[美] James D. Stein 著　程玺 译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

数字版权声明

图灵社区的电子书没有采用专有客户端，您可以在任意设备上，用自己喜欢的浏览器和PDF阅读器进行阅读。

但您购买的电子书仅供您个人使用，未经授权，不得进行传播。

我们愿意相信读者具有这样的良知和觉悟，与我们共同保护知识产权。

如果购买者有侵权行为，我们可能对该用户实施包括但不限于关闭该帐号等维权措施，并可能追究法律责任。

作者介绍

James D. Stein，耶鲁大学学士，加利福尼亚大学伯克利分校博士，现为加利福尼亚州立大学长滩校区的数学教授。著有：《数学如何解释世界》（*How Math Explains the World*）、《正确的决策》（*The Right Decision*）以及《数学如何帮助你的生活》（*How Math Can Save Your Life*）等。

TURING 图灵新知

揭示宇宙奥秘的13个常数

[美] James D. Stein 著　程玺 译

Cosmic Numbers:
The Numbers That Define Our Universe

人民邮电出版社
北　京

图书在版编目（CIP）数据

揭示宇宙奥秘的13个常数/（美）斯坦（Stein，J. D.）著；程玺译. --北京：人民邮电出版社，2012. 7
（图灵新知）
书名原文：Cosmic Numbers：The Numbers That Define Our Universe
ISBN 978-7-115-28588-1

Ⅰ. ①揭… Ⅱ. ①斯… ②程… Ⅲ. ①宇宙－普及读物 Ⅳ. ①P159－49

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第128137号

内 容 提 要

作者以定义宇宙的13个数字为线索，梳理了人类探寻这些数字的历史过程以及这些数字的物理学、化学或天文学意义。在叙述过程中，作者夹杂了个人经历、诗歌、音乐等元素，娓娓道来，使得本书成为一本科学与人文并重的科普读物，适合对科学感兴趣的读者。

图灵新知
揭示宇宙奥秘的13个常数

◆ 著　［美］James D. Stein
译　程　玺
责任编辑　朱　巍
执行编辑　楼伟珊

◆ 人民邮电出版社出版发行　北京市崇文区夕照寺街14号
邮编　100061　电子邮件　315@ptpress.com.cn
网址　http://www.ptpress.com.cn
北京　印刷

◆ 开本：880×1230　1/32
印张：7.625
字数：197千字　2012年7月第1版
印数：1-5 000册　2012年7月北京第1次印刷

著作权合同登记号　图字：01-2011-7481号

ISBN 978-7-115-28588-1

定价：35.00元

读者服务热线：(010)51095186转604　印装质量热线：(010)67129223
反盗版热线：（010）67171154

版权声明

图片使用说明

谨以本书献给威廉·巴德教授
感谢您的所有帮助

译 者 序

在人类对宇宙的认识过程中，数字是最基本也是最根本的内容。在我们每个人牙牙学语的时候，数字也是我们最先用手指比划出的语言之一。数字如此简单，只有从 0 到 9 十个字符，但又如此复杂，仿佛其中蕴涵着整个纷繁的宇宙；数字如此明了，一就是一，二就是二，却又如此神秘，似乎一不只是一，二也不只是二。这大概就是数字的神奇与美妙之处吧。

本书作者正是有感于数字之美，才决定写作这么一本关于基础常数的书，其中选取的常数涉及物理学、化学、天文学等各个学科。为面向更多读者，作者尽可能采用简洁易懂的语言，深入浅出地将这些神奇数字及它们背后的故事一一呈现在读者面前。在讲述的过程中，作者不但结合了许多亲身经历，更不时穿插音乐、绘画、诗歌等内容，在严谨的科学论述中加入了不少轻松的文艺气息。

作为一位资深摇滚乐迷，我在翻译一本科普图书时，却能频频遇到吉姆·莫里森、布鲁斯·斯普林斯廷这些耳熟能详的名字，不能不说是件令人兴奋的事情。同时，这也改变了我对于传统科普读物的既定印象，科学狂人的形象一下子变得不那么冷冰冰，而开始有了温度。当今时代，不管是中国还是外国，似乎都有一种趋势，各行各业的人都在试图打破自己的藩篱，向陌生的领域寻找灵感。此类例子多不胜举，建筑师扎哈·哈迪德从生物化学找来新的建筑机理，作家王朔从天体物理学

找来新的叙述方式，电视剧以《宇宙大爆炸》命名讲述科学狂人的情感生活，如此等等。知识界也纷纷撰文批评专才教育，而提倡新的通才教育。人们越来越不愿意做毫无文艺细胞的读书匠，或是毫无逻辑能力和科学素养的梦想家。

科学、艺术、生活，这些都是摆在三生有幸的我们面前的盛宴，作者并没有忽视其中任何一项。科学自不必说，通过 13 个可以说是精彩绝伦的数字，整个宇宙的根基便浮现在了我们面前；而在各种艺术之中，作者似乎尤其偏爱诗歌，因此相关的描述也最多；在生活方面，除了穿插许多亲身经历以外，作者对科学家背后的情感和纷争也着墨甚多，为我们呈现出了伟大的科学家们各种有趣的故事和感人的情怀。

所有这些内容，至少让我这个译者受益匪浅，希望也能给广大读者带来启迪。很荣幸能担任此书的翻译工作，感谢图灵教育的傅志红老师给了我这个机会。翻译中难免有不尽如人意之处，望大家给予批评指正。

程玺

2012 年 1 月 5 日

前　言

在我写作本书的过程中，一些我从未经历过的事情悄然发生了。

虽然已经写过几本书，但我还算不上什么有名的作家，并非写出书来马上就有知名出版社愿意出版。和大部分想出书的作者一样，我需要事先准备一份计划书，列出这本书的大纲，分析潜在的读者，并提供几个章节的内容样稿。之后，我的经纪人会拿着计划书向各个出版机构推销，运气好的话，会有某家出版社答应出版。

一直以来我都对数字着迷不已，有天突发奇想：某些数字（你可以称之为“宇宙之数”，它们就是本书的核心内容）的发现过程应该能写成一本引人入胜的书。不过，太阳底下没有新鲜事，其他作者已经有过类似的构想。马丁·里斯就写过一本书，叫做《宇宙的6个神奇数字》（其中几个数字也见于本书），其中讲述了他所认为的居于宇宙学核心地位的6个数字。但除了这6个数字以外，我觉得还有一些数字的故事也值得一说。因此，我写下了本书的大纲、引言以及关于绝对零度的一份样稿。结果令我喜出望外，不仅科普书籍的主要出版社 Basic Books 同意出版本书，而且T. J. 凯莱赫也答应担任本书的编辑，我之前的《数学是如何解释世界的》也是跟他合作的，因此我知道他是位了不起的编辑。

凯莱赫是一位非常优秀的编辑。在我们上次合作中，他花了很多时

间来组织章节的结构和顺序，大大提升了那本书的流畅度和可读性。虽然他改动了我最初的提议，但无疑也带来了更好的效果。而对于这本书，结构问题则有所不同。本书所讨论的宇宙之数分别属于自然科学的三个分支：物理学、化学和天文学。一开始我以为只要照着这些线索按部就班写下去就好了，于是我就开始写作理所当然的第 1 章——万有引力常数。

然而本书写作过程中的不同寻常之处在于，每一章似乎都会自然地引出下一章，自然地按科学发展的历史次序排列而非按具体学科来划分。完成几章以后，我就意识到，我其实是通过所选取的这些数字来写一部科学史纲要。当然这绝非一部完整的科学史，比如生命科学就没有涵盖在内，而且本书内容也只截至 20 世纪中期。尽管如此，如果一位对科学一无所知的人（不幸言中很大一部分美国民众）读完此书，他或她将会对自然科学的主要发展历程建立起非常清晰的认识。这是一部由数字写就的历史，当然这里指的不是一般意义上的阿拉伯数字。

另外还有一些事情值得一提。在此书的准备过程中，我查阅了很多资料，并有机会读到一些科学家的传记。这些传记，不论本身的写作水平，还是其中详实调查所体现出的严谨作风都令我印象深刻。其中一些我列在了后面的注释中，以下则是最令我有醍醐灌顶之感的几本：《光之主人》（*The Master of Light*）将阿尔伯特 · 迈克耳孙的一生娓娓道来（作者是他的女儿）；英格尔伯特 · 布洛达短小精悍的《路德维希 · 波兹曼传》（*Ludwig Boltzmann*），读完此书你会渴望能与波兹曼共度一个小时；还有卡梅施瓦尔 · 瓦利的《钱德拉塞卡传》（*Chandra*），在书中，钱德拉塞卡教授是一位令学生敬畏甚至恐惧，同时令所有同仁敬仰和热爱的人物。

本书能够顺利完成，以下四位的贡献绝对功不可没。第一位就是编辑凯莱赫先生，他的编辑方式和我见过的其他所有编辑都不同。有时候，即使他删掉了一些我很满意的段落，文章的整体性却几乎毫发无伤，而且每次修改过后，整本书的效果总是更好了。一开始我会觉得在第1章他修改过的部分，我们两人的风格总有一点隔阂。但等他改完之后，我再去读，竟然了无痕迹，完全像是我一个人完成的，真不明白他是怎么做到的。作为作者，我只能按照自己的风格来写，而凯莱赫却能自如地转换各种风格，我想每一位跟他合作过的作者都可以证明这一点。这样一位编辑能为作者提供很大的帮助，他不但能发现作品叙述中的缺陷，而且能修改得天衣无缝，和你自己写的一模一样。最后一点，凯莱赫对于科学和数学的热爱也是在科学家和数学家之外的人群中十分罕见的。我认识的人里面只有一位与他相像，那就是我的父亲。而且非常巧的是，我父亲和凯莱赫一样都是从哈佛毕业的。

第二位是我的经纪人朱迪·罗德斯，我的整个写作事业都要归功于她。对于作者来说，当今并非是一个好时代，出版商常常不愿意做有风险的事，图书销售也不景气。在这样的环境之下，经纪人不但要屡败屡战，而且要时刻站在写作者的立场上，维护他们的权益，要做到这些是极其困难的。其他经纪人面对如此困境可能就主动退缩了，而朱迪却一直坚定地站在我身边，为我摇旗呐喊，尽管前方路途险阻，也义无反顾。虽然我自认写作水平还说得过去，但仍然需要找到志同道合的编辑和出版商，朱迪所拥有的丰富经验使她总能找到认可我的作品、与我相得益彰的编辑和出版商。或许其他经纪人也有可能做到这一点，但我对此十分怀疑，她要是退休了我真不知道该如何是好。

第三位则是我有幸教过最出色的学生，戴夫·麦凯。在20世纪80年代，戴夫曾报名参加过我讲授的数学分析进阶课程。从此以后，我就

把戴夫当成了我的朋友和同仁。在本书的写作过程中，戴夫为我提供了很大的帮助。身为加利福尼亚州立大学长滩校区的一名教员，戴夫不但是一位经验丰富的数学老师，同时也是一位非常优秀的物理学老师。虽然我也一直很热爱物理学这门学科，但这种热爱更多的是一种远观而非近玩。我对于伟大的物理学观点从没有像对某些数学观点那样理解得清晰透彻。而物理学正是戴夫的专长，他花了 25 年时间认真钻研物理学，使他能够看得越来越清楚，就像数学家对于数学的了解一样。

本书包含了大量的数字运算，因为本书不仅是关于定义这个世界形态的那些宇宙之数，同时也是关于数字这门通用语言（借用伽利略的说法）。不过，书中的大部分运算只需要了解最基本的代数学、几何学或者再加上一点三角学的知识即可。另外，在这些运算的背后通常也暗含着一些物理学知识。这些物理学知识的基本原理并没有涵盖在本书内容之中，不过其中用到的等式和公式在大部分基础性物理学书籍中都找得到。

最后但绝非最次要的一位，就是我的妻子琳达。有一首歌叫做《你是我生命中的阳光》，虽然曲调很一般，歌词也有点过于文艺腔，但是它很恰当地诠释了琳达带给我的感觉。她虽然没有参与这些书的写作，但她所做的工作为我写书扫清了许多障碍。就像数学会让一些人抓耳挠腮、无所适从一样，合同一类的东西也会对我产生类似的效果，我甚至无法完整读完合同中的一个段落，而琳达却能细心阅读和清晰梳理。当然，这一点是琳达作为“我生命中的阳光”时带来的额外福利。

本书出版的时候，我就要满 70 岁了。70 岁的我只有两个遗憾，全都与我的父母有关：其一是他们没能看到我出版的任何一本书，其二是他们从未见过琳达。我想，这两点都是应该会让他们开心的事。

目　　录



第 1 章

万有引力常数

牛顿在 17 世纪度过了他人生的大半时光，对于那个时代的生活状态我无法完全了解。当时，世界还停留在炼金术时代，许多让人（至少对我来说）赖以度日的小东西尚未出现：没有卫生纸，没有牙膏，也没有电视电话。但那已是个书籍和报纸的时代，是书信和日记（17 世纪的博客）的时代，有赖于此，我们才对牛顿在大约 1664 年往后的所有一切了如指掌，就像突然在他脚踝上安装了一个 GPS 装置一样。

但是牛顿生于 1642 年，这中间还有一大段的空白。就我们所知，有一点似乎很清楚，牛顿并未像音乐家莫扎特或数学家高斯一类的天才那样在年少时期便展露出伟人的锋芒。母亲对他的期望是让他成为一个农民。幸好牛顿对于农事毫无兴趣，虽然母亲的态度十分坚决，但最终在牛顿所就读学校的校长（似乎是当时唯一看到牛顿潜力的人）和他叔叔的联合劝说下，才答应了把牛顿送去剑桥大学的三一学院读书。1661 年，牛顿顺利进入了他的“安全学校”。这无疑是历史上最成功的 B 计划之一。

牛顿在学院度过的早期时光也并没有被他自己或同代人很好地记录下来。他在日记中记录了一些幸事（“去酒馆两次”）以及衰事（“打牌输掉两次”），但其中并没有丝毫天才破土而出的讯息。情况在 1664 年峰回路转，在当年“流水账”式的日记本中，牛顿记下了非常严肃认真的数学研究。在此之前，牛顿的数学知识似乎只有如今高中二年级学生的水平。牛顿当时的算术学不错，但他在代数学、几何学和三角学方面则有所欠缺。假如以他当时的水平去参加 SAT 入学考试的话，恐怕也拿不到什么好成绩。牛顿是通过购买或借阅各种最前沿的数学书籍跟上了学习的进度。从奥特雷德的著作《数学之钥》（*Clavis Mathematicae*）[1] 中，他学习到代数学的强大和灵活性，这为他日后提出二项式定理奠定了基础。他也从沃利斯的《数学文集》（*Opera Mathematica*）[2] 中汲取

养分，最终发展出他在数学领域的标志性成就——无穷小微积分。而通过阅读斯霍滕翻成拉丁语的笛卡儿的《几何学》（*Geometrie*）[3]，牛顿弥补了自己在几何学方面的缺陷。

他应该是在 1665 年拿到学士学位，那一年英国爆发了最后一次大规模的黑死病疫情。由于人口密集，卫生条件差，疫情广为蔓延。从一些侧面也可以印证疫情的严重性，查理二世国王的宫廷从伦敦撤离到了牛津郡，剑桥大学也关闭了。于是牛顿返回他位于乌尔索普的家乡，在那里度过了一年半的时光，“专心研习数学与哲学”[4]。就是在这段时间，他重塑了整个世界。

万有引力定律的发展

牛顿在数学领域有着突出的贡献，但最令他名垂千古的仍是其对于科学的贡献，因为科学进步才是引领人类前进的主要动力。虽然牛顿在光学领域作出了重大贡献，但他能获得如此地位的主要原因，首先归功于他在力学和万有引力方面所做的工作，其次则是他发展出的理论及实验的科学方法。

对一条科学理论的首次阐释几乎都不是最简单的版本。像牛顿这样的革新者通常并不关心自己所说的是否能被普罗大众所理解，他们更感兴趣的是要让同行接受其观点，然后以此为基础搭建理论的大厦。牛顿的《自然哲学之数学原理》[5]便是如此。这本书通常简称为《原理》，我会偶尔拿来翻一翻，也曾下决心等退休之后好好读一读（不过它还在尚未完成的列表中）。《原理》的风格仿照了标准的几何学教材，公理、定理、前提条件、证明，条分缕析，而许多结论实际上也是几何学的。这一点并不意外，因为这本书的主要成就之一就是为开普勒三大定律的

解释提供了依据（其中一部分就是牛顿对万有引力定律的论述），而这三条定律全部都是几何学的。开普勒第一定律是指行星围绕太阳运动的轨道都是椭圆的，太阳处在椭圆的一个焦点上。开普勒第二定律是指太阳中心和行星中心的连线在相等的时间内扫过的面积相等。开普勒第三定律是指各行星绕太阳公转周期的平方和它们的椭圆轨道的半长轴的立方成正比。

这些定律不只是一位优秀的几何学者通过某些前提所推出的结论，它们都有经验基础，是基于第谷・布拉赫辛苦积累的数据，经过长期的数据收集和模型拟合才得出的。第谷是一位对天文学感兴趣的丹麦贵族，他很欣赏开普勒的早期工作，于是邀请开普勒来到他位于布拉格附近的住所，当时他正在那里建造一座新的天文台。于是，开普勒就成为了第谷的思想传人。

当时，哥白尼革命渐成气候，开普勒尝试将第谷的那些宝贵数据与哥白尼的太阳系模型结合起来，后者认为行星是沿着均匀的圆形轨道围绕太阳运动的。开普勒最初设想的行星圆形轨道模型还引入了五个正多面体——正四面体、立方体、正八面体、正十二面体以及正二十面体。

无论如何，开普勒是打算把手头的数据塞进圆形轨道模型之中的。值得庆幸的是，第谷当时刚刚获得了十分准确的火星观测记录，记录显示出火星的轨道明显不是圆形。要是当时第谷刚刚完成观测的不是火星而是金星，而金星的轨道几乎就是一个完美的圆，那么开普勒何时能发现第一定律或者最终能否发现第一定律，可能就要打上一个问号了。

第一定律的发现体现出开普勒十分严谨的科学态度，而第二和第三定律的发现则凭借的是他过人的数学能力。计算第二定律中扫过区域的

面积已经大大超出了基础欧几里得几何学的能力，同时，找出第三定律中所蕴涵的复杂关系也要求具备相当的数学天赋。尽管任务艰巨，开普勒仍投入了数年时间来构建和检验其第二和第三定律。在这个过程中，开普勒遭遇了众多个人及政治上的变故，他的妻子和最爱的一个儿子都因病离开了人世，又由于拒绝皈依天主教，他可以谋生的途径也受到限制。此外，他的母亲遭到施行巫术的指控，他不得不为此事奔波，进行辩护。在当时，此项指控是会导致酷刑致死的。不过，这项指控被证明是出于传言。（这并不意外，因为据我所知，不论是当年还是现在，货真价实的巫术案件并不多见。）最终，开普勒帮助母亲证明了清白。

开普勒的墓志铭很好地总结了他的成就：

> 我曾测量天高，今欲测量地深；
> 思想遨游天际，肉体长眠大地。[6]

速度问题

从开普勒第一及第二定律中可以直观得出的结论是，行星运行在自己的轨道中，在不同的位置上运行的速度不同。所谓椭圆就是两端拉长的圆圈，形状好像飞艇，有一长一短两根对称轴。如果画一个椭圆代表行星的轨道，并把太阳置于椭圆长轴的左焦点上，再假设行星在靠近太阳的一端从长轴的紧上方运行到关于长轴对称的紧下方(图 1)①，我们可以将行星扫过的区域大概视为一个等边三角形（虽然行星的运动轨迹是一条曲线，但在很短的距离内，我们可以将其视为与长轴垂直的

① 本书插图均为编者所加，部分图片的许可协议见文前的“图片使用说明”，图注文字遵从 CC-BY-SA. 3. 0 协议。——编者注

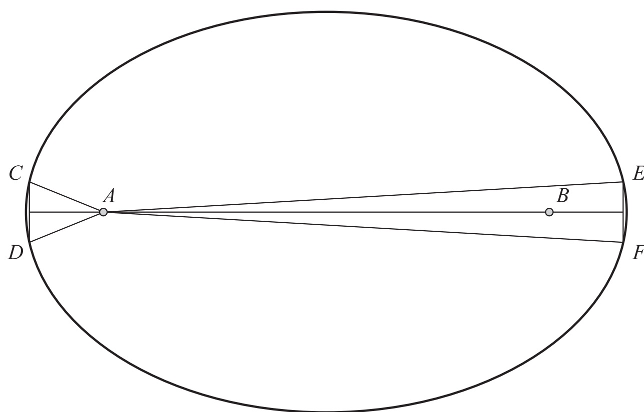


图 1

一条线段）。三角形的高是长轴上太阳与近侧椭圆弧之间的距离，由于太阳位于椭圆的左焦点，因此这一距离比长轴的一半要短。很明显，如果行星的运行速度保持不变，那么在相同的时间内，不管它是靠近太阳还是远离太阳，它在轨道上都会划过相同的距离。这时，如果行星在长轴远端的紧下方运行相同的距离到了紧上方，根据开普勒第二定律，仍然可以将行星扫过的区域视为一个等边三角形，那么这个等边三角形的底边和刚才的相同。然而，这个三角形的高是从太阳到长轴远端的距离，这比长轴的一半要长，因而前后两个三角形的面积是不同的。因此，如果开普勒第一及第二定律成立，那么行星在太阳近端和远端的运行速度应该是不相同的。

牛顿在微积分方面所做的工作对于解释以上问题非常重要。微积分提供了一种方法，能够用于确定不断变化的数值，比如行星或一辆车在任意特定时刻的速度。举例来说，某个下午我花了三个小时从洛杉矶开车去圣地亚哥，全程 210 千米。通过简单运算，我的平均速度为每小时

70 千米，但这无从告诉我汽车经过 405 号州际公路的开阔地带时速度有多快，或是米申维耶霍附近遇到堵车时速度有多慢。如果要确定汽车在下午两点钟的速度，我们需要查看某一时间段内的平均速度，并逐渐把时间段缩小。要确定某一个时间点的速度，以之为起点往后一秒钟内的平均速度要比以之为起点往后一分钟内的平均速度更加准确，因为在一分钟的时间段内汽车改变速度的可能性更大。如果我们测量平均速度时选择更短的时间段，比如说 0.001 秒，那么所得出的速度就十分接近汽车在时间段起点的准确速度了。当然，前提是我不能在这 0.001 秒内撞上一辆卡车。

牛顿的《原理》不仅意识到这个问题，而且还提出了一种可以计算出在任何时间点的瞬时速度的方法，在今天的微积分中被称为差商法，其中涉及对平均值求极限。他同时预料到了很多微积分学生在学习这部分时会面临的困难①：

> 所以我在证明以后的命题时宁可采用最初的与最后的和，以及新生的与将趋于零的量的比值，即采用这些和与比值的极限，并以此作为前提，尽我可能简化对这些极限的证明。这一方法与不可分量方法可作相同运用，现在它的原理已得到证明，我们可以更可靠地加以使用。所以，此后如果我说某量由微粒组成，或以短曲线代替直线，不要以为我是指不可分量，而是指趋于零的可分量，不要以为我指确定部分的和与比率，而总是指和与比率的极限，这样演示的力总是以前述引理的方法为基础的。[7]

① 以下文字引用了王克迪的译文，参见：《自然哲学之数学原理》，王克迪译，袁江洋校，陕西人民出版社，武汉出版社，2001 年，第 49 页。——译者注

虽然我对于微积分知识有很好的把握，但上面这段牛顿的解释对我来说也不好懂。而对一名 21 世纪的学生来说，我以为，要从他的书中学习不论是微积分还是万有引力定律，几乎都是不可能的。

大 G 和小 g

牛顿万有引力理论的核心内容实际上包含两个常数：《原理》一书中所描述的普适常数 G，以及在地球表面由重力引起的局部加速度 g。后者常被称为小 g，相对来说比较容易测量，只要我们不要求太高的精准度，比如能够接受小数点后两位或三位的近似值。在一块真空区域（消除空气阻力），让一个物体自由下落，测量坠落距离和坠落时间即可计算出近似值。最初是伽利略发现物体的坠落距离与坠落时间的平方成正比，这一点同样也是牛顿万有引力定律的众多推论之一，在微积分第一学期的课程中就会见到：令距离为 d，时间为 t，则有公式 $d=\frac{1}{2}gt^2$，很容易就可以计算出小 g 大约为 9.8 米每二次方秒。将该数值拆开来看会比较容易想象，“9.8 米每秒”（停顿）“每秒”。也就是说，物体基于地球重力下落的速度每秒增加 9.8 米每秒。在月球表面，物体的坠落速度会慢得多，这一点宇航员已经向我们展示过了，这时即使是大笨狼怀尔也来得及从坠落的铁砧下逃脱。正因如此，小 g 并非普适常数，而是一个局部常数。

大 G 则是普适常数，但 G 和 g 之间存在一种关系，你可能已经有所预料了。牛顿的重要成就之一，就是提出了球体的万有引力的表现形式就好像其全部质量均集中于中心的一点上。因此，地球（质量为 M，半径为 R）对一个质量为 m 的物体所施加的引力就有两种计算方式：按照

万有引力定律，$F = GmM/R^2$；按照牛顿的第二力学定律，$F = mg$。将两个等式合并，等号两边的 m 被抵消掉，从而推出等式 $g = GM/R^2$。古希腊人就已经掌握了 R 的大体数值，但如果要确定 G 的大小，则必须知道 M 的数值，这一点直到牛顿去世以后很久才有所进展。

事实上，在之后的两个世纪里面，并没有人真正想要确定 G 的大小，因为那一时期的所有科学研究都不需要用到 G 的数值。过去在天文学中的很多进展，今天也依旧如此，都是利用比例来计算的。这一点并不意外，因为通过各种比例等式也可以进行很实用的运算，在《原理》一书很久之前人们就已经这么做了。比例最早出现在算术学里。（如果两个鸡蛋做成的饼干够三个小朋友吃，那么多少个鸡蛋做成的饼干才够 12 个小朋友吃呢?）之后又出现在几何学里，我们可以利用相似三角形对应边的比例等式来测量一棵无法攀登的树或远处山峰的高度。这两种对于比例的应用（算术学和几何学）在自然科学领域都有着非常重要的实用性，在日常生活之中也是如此。鸡蛋数量不对的话，烤出来的饼干可能就会参差不齐，而这应该不是你期望看到的。

牛顿能从他的万有引力定律中推导出开普勒第三定律——任何两颗行星公转周期之比等于行星与太阳平均距离的立方之比。天文学家可以利用这些比值，再加上地球与太阳之间的距离（乔凡尼・卡西尼在《原理》一书出版之前十多年就算出了该数据）[8] 以及一颗行星的公转周期便可计算出该行星与太阳之间的平均距离。整个计算过程完全不需要知道万有引力常数，因此便没有人费心去钻研它，它的面纱直到 18 世纪末才在一项实验中被揭开。

卡文迪许试验

大多数伟大的科学家除了留下了他们的理论和实验记录之外，还会给人留下很多关于他们参与各种会议以及与其他科学家在工作上或私底下交往的记忆。不过就像我们的日常世界一样，科学世界也存在一些孤独者，18 世纪最伟大的实验科学家之一亨利・卡文迪许便是其中一位。

卡文迪许 1731 年生于法国，父母为查尔斯・卡文迪许公爵和安妮・格蕾夫人，他因此继承了很大一笔遗产。他在剑桥大学读了三年书后便辍学了，也没有拿到剑桥的学位，但这并未对他的科学事业造成一丝一毫的妨碍。不过卡文迪许却在私人生活中面临着严重的障碍，社交场合和人际关系对他来说似乎是个天大的困难。他在女子面前过分害羞，连与家里的女仆沟通时都需要动用纸条。为了防止与女仆狭路相逢，他甚至还在家里修建了特别的楼梯通道和入口。显然，卡文迪许的社交活动并不值得写进日记之中，不论是他自己的日记还是他人的。他在公共场合现身的记录大概就只有参加科学会议的场合了。

知名医生和作家奥利佛・萨克斯曾经认为卡文迪许患有阿斯伯格综合征，这种病与孤独症类似，患者对于与他人接触以及重复相同的行动感到十分困难。但重复行动，或者至少愿意翻来覆去做一件事，恰好是成为一名实验科学家所必需的素质，而卡文迪许在化学和电学方面的研究都作出了卓越的贡献，其中包括他对于空气成分的分析。他发现空气中包含大约 20% 的“可燃气体”（氧气）以及接近 80% 的氮气，并提出空气中还含有大约 1% 的其他气体。直到一个世纪以后，人类才发现氩元素以及这种元素存在于空气中的证据。同时，他对于“易燃气体”（氢气）也做了很多先驱性的研究工作，并对于氢和氧作为水的化学成

分这一发现富有贡献，已经十分接近于准确的 H_2O 的分子式。[9]

卡文迪许在电学研究方面也作出了突出的贡献，他是最早研究绝缘材料（不导电的材料）的科学家，也是最早区分出电荷与电压的人。同时，受到关于某些鱼类能够发出电击的新闻报道启发，他还第一个进行了水的导电研究：他实实在在用皮料和木材做了一条鱼的模型，将之放入咸水中，并在其身上安装模拟的发电器官，实验显示出鱼的确可以发出电击。虽然卡文迪许并未在发表成果方面做过多少努力，但他还是将研究内容记录了下来，这些记录后来被著名科学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦整理和发表，这一方面确保了卡文迪许在身后获得他应得的荣誉，另一方面也说明卡文迪许在英国科学界声望之高。

最令卡文迪许广为人知的一个实验首次确认了地球的密度，因此现在通常被称为“卡文迪许实验”。虽然测量地球密度是卡文迪许的初衷，但该实验常常被称为“给地球称重”，因为一旦地球平均密度确定之后，自然可以通过简单的密度与体积的乘积得出非常精准的地球重量。实际上，由于该实验广为人知，在之后的许多年里，居住在卡文迪许家周围的邻居一直将他居住的那栋建筑称为“给地球称重的地方”。由于卡文迪许鲜少在公众场合露面，可以说他是一位真正久闻其名未见其人的科学家。

该实验是一项独具匠心的杰作，实验中采用了一台被称为扭秤的装置（图 2）。两个较大较重的球相互分开固定好，两只小球分别悬挂在扭秤的横杆两端，就像一只小哑铃，而横杆挂在一根悬丝上。大球和小球之间的万有引力使得小球会发生非常细微的转动（如果通过磁铁而非万有引力来制造这种转动效果，所得到的转动幅度要大得多，这一点也说明了磁力要比万有引力强得多）。旋转的幅度可以测量出来，然后就可以用来计算地球的平均密度或地球质量。由于卡文迪许的测量装置十

分精密，他计算出的结果一个世纪后才被超越。

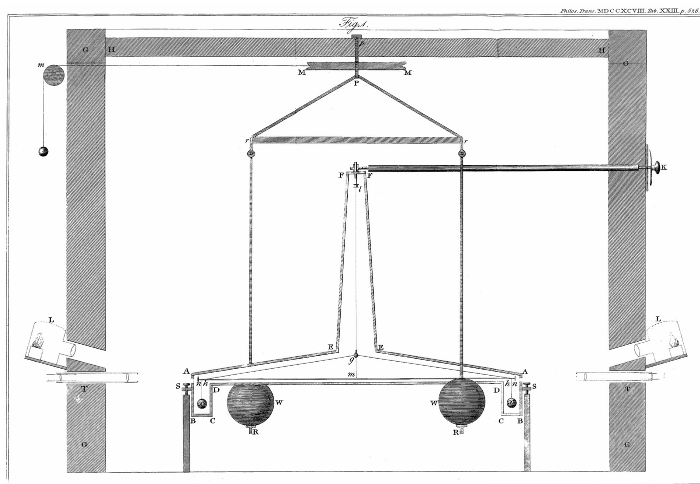


图 2　卡文迪许的扭秤（来源：*Philosophical Transactions of the Royal Society of London*，vol. 88，p. 526，1798）

在卡文迪许的数据背后隐藏着一种计算万有引力常数的方式，可是由于当时并没有什么人真的在意万有引力常数，所以也没有人费心去算它。今天的物理学家则可以利用卡文迪许的数据，以一种相对简洁明了的方式计算出万有引力常数。

假设 M 为大球的质量，L 为哑铃形状横杆的长度，θ 为横杆旋转的角度，r 为旋转结束后大球中心与小球中心之间的距离，T 为扭秤的自由振荡周期（就像一个钟摆周期）。状态稳定后，两种施加在小球上的力，大球的吸引力及悬丝欲恢复原状所施加的复原力是相等的，这样便可得出以下计算万有引力常数 G 的公式：

$$G = 2\pi^2 Lr^2 \theta / MT^2$$

实际上，卡文迪许在计算地球平均密度时采用的也是同样的参数。他运用牛顿第二力学定律，将小球所受净力 mg 和万有引力 GmM_E/r_E^2 画上等号，这里 M_E 和 r_E 分别表示地球的质量和半径。我们也可以这么做，设地球的平均密度为 ρ，由于地球体积为 $4\pi r_E^3/3$，于是可以得出 $\rho = 3g/(4\pi G r_E)$。实际上，卡文迪许算出的地球密度为 5.448 克每立方米，而在对外公布的时候，他却非常意外地漏掉了一个数字 4，给出了 5.48 克每立方米的结论。

我们习惯于将出生以前的时代都看成相对原始，18 世纪末似乎仍趋近于旧石器时代：当时，生病的原因尚不可知，马背仍然是最快速的运输方式。即便如此，卡文迪许当时的实验结果已经极为精确。如今在网上已经有非常丰富的相关资料，大家还可以读到卡文迪许自己关于这次实验的报告。[10]

他或许不具备今日的资源，但他对计划和执行实验投入了无比的耐心。同时，他也保有学术诚信。在给《自然科学会报》的报告中，卡文迪许写道：“许多年前，已故的皇家学会会员约翰·米歇尔精心设计出了一种方法，利用小质量物体之间微弱的吸引力来测算地球密度。但由于他一直忙于其他工作，直到去世前不久才完成了这一测量仪器，因而也未能使用该仪器进行任何科学实验。他去世以后，设备辗转到了剑桥大学教授弗朗西斯·约翰·海德·渥拉斯顿手中。但这位教授不具备方便的实验条件，于是就非常好心地将设备转给了我。”[11]同时，这位米歇尔也是第一位设想黑洞存在的人。在我看来，历史实在是欠米歇尔一个公道。整个实验是他的思想，用的是他的设备，或许是时候将这个实验的名称改为米歇尔-卡文迪许实验了。

不然还要等到什么时候呢?

现代科学非常看重对于基础常数数值的测定。国际科技数据委员会（CODATA）会定期收集最新的基础常数数据。我所能找到 G 的最近一次更新是在 2006 年的 CODATA 报告[12]中，那一节的报告开头如此写道："华中科技大学团队……利用扭秤周期法测量了 G 的数值。他们使用了高 Q 值的扭秤，两端各悬挂一个重 6.25 千克的不锈钢圆柱体……"[13]在米歇尔和卡文迪许去世两百多年的时间里，人类的科技发展天翻地覆，但他们所提出的实验方法依旧保持前沿地位。在 8 次确定万有引力常数的测量实验之中，共有 6 次使用了扭秤。

为什么我们需要尽可能精确的 G 的数值

这并不是个只有像卡文迪许那样的科学呆子才感兴趣的话题。

万有引力常数是整个宇宙的基础。人们意识到它的存在可能要早于任何其他的基础常数，然而迄今为止，我们也只是将其精确到了小数点后 5 位，低于本书介绍的所有其他常数的精确性。原因主要在于万有引力相比其他力（电磁力、强核力、弱核力）来说极其微弱。在不久的将来，我们应该能看到这方面精确测量的进展。2006 年 CODATA 报告中关于万有引力常数的章节中也提到科学家正在使用原子干涉技术进行实验，通过分析波形图来确定万有引力常数。不过，可能也存在众多其他可利用现有数据的实验方法。

如果某个物体沿圆形轨道围绕地球运行，其轨道半径为 r、轨道周期（物体绕地球运转一周所需的时间）为 T，而地球质量为 M，那么就可以推算出轨道周期 $T = 2\pi r^{3/2}/(GM)^{1/2}$。假设 r、G、M 三者数据未知，

但只要有足够多的物体沿着圆形轨道运转，我认为就有可能测算出 T 和 r 的数值，并能达到一个很高的精度。只要有两个不同的物体，就有两个关于 G 和 M 的等式。根据任意一对沿着圆形轨道运转的物体都可以求得 G 和 M 的数值，而这些结果可以继续进行统计分析。即使轨道不是圆形的，也可以利用轨道参数确立一个轨道周期的等式，事实上太空中正有非常多的碎片围绕着地球旋转。

或许我们无法测量到足够精确的数据，或许电脑还无法胜任这样的分析工作，或许某种统计学原理会排除掉此种可能性，但即便如此，也值得一试。NASA 有一个有关太空碎片的庞大数据库，如果我是个数据挖掘师，就会带上我的数据铲子和凿子，一头扎进这座数据金矿之中。

为什么要这么较真呢？其中一个原因是它会为未来的空间飞行带来潜在的麻烦，特别是当我们有能力探索恒星的时候，我可不想因为没有掌握 G 后面足够的小数位数而在抵达比邻星前就耗尽了燃料。不过，更紧迫的一个原因在于，精确的 G 的数值能够帮助我们更精确地确定未来可能会威胁到地球的那些彗星和小行星的位置。有效的预警能够让我们提前做好防备。

注释

[1] D. Whiteside, "Sources and Strengths of Newton's Early Mathematical Thought" in *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton, 1666～1966*, ed. R. Palter (Cambridge, MA: MIT Press, 1970), 74。

[2] 同上。

[3] 同上。

[4] J. Gribbin, *The Scientists: A History of Science Told Through the Lives of Its Greatest Inventors* (New York: Random House, 2003), 181。

[5] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, trans. Motte, revised by Cajori (Berkeley: University of California Press, 1962)。

[6] T. Koupelis, *In Quest of the Universe* (Sudbury, MA: Jones & Bartlett Publishers, 2011), 62。

[7] S. Hawking, *Principia*, *Isaac Newton*: *On the Shoulders of Giants* (Philadelphia: Running Press, 2002), 32。

[8] 著名的意大利天文学家乔凡尼·卡西尼（以其名字命名的探测器正绕着木星飞行）是首位精确测算出太阳与地球之间距离的天文学家。他所采用的测量方法被称为视差法，利用的是当时得到改进的望远镜以及这样一个简单事实：当我们从两个不同位置对着固定背景观察一个附近的物体时，该物体在固定背景上的位置会发生移动（试着分别用左眼和右眼对着远处的天际线观察一个附近的物体，你就可以体会到这一现象了）。通过测量夹角的角度以及两个观察点之间的距离，再运用几何学和三角学的原理，便可计算出观察者与那个附近物体之间的距离。卡西尼和一位天文学家同事在同一时刻分别在巴黎和法属圭亚那进行了测量，最终测算出的太阳与地球之间的距离跟现在大家所接受的数值仅存在 1% 的误差。

[9] 在确定元素原子量的道路上，水的化学构成是一个主要障碍。虽然卡文迪许似乎已经发现了 H_2O 的分子式，但道尔顿在发展其原子理论时则显然没有意识到这一成果，或是拒绝承认这一成果。正如我们将在第 5 章看到的，阿伏伽德罗提出了准确的分子式，同时也提出了支撑这一分子式的理论。

以下站点中便将提出水的分子式（2.02 份氢气相应 1 份氧气）归功于了卡文迪许：http://mattson.creighton.edu/History_Gas_Chemistry/Cavendish.html。

[10] 可参见 http://www.archive.org/details/lawsgravitation00cavegoog（2011 年 1 月 6 日有效）。

[11] 同上，第 59 页。

[12] 可参见 http://arxiv.org/find（2011 年 1 月 27 日有效）。这是数据库首页，只需在“Experimental full text search”条目下输入“CODATA 2006”搜索即可。

[13] 同上，第 57 页。



第 2 章

光　　速

由于对数学和科学怀有浓厚的兴趣，我会在一些意想不到的领域寻找数学和科学的影踪，特别是在我最爱的歌曲歌词里面。当听到大门乐队的吉姆·莫里森唱道“一千个女孩儿，一千种颤抖，装满了这艘水晶船，你有百万种方法来度过余生”[1]，我的第一反应（除了听歌的愉悦以外）就是莫里森本人一定非常了解组合学的基本知识，因为他写得非常准确：如果你亲自参与这一千个女孩儿各自的一千种颤抖方式的话，除了搞得筋疲力尽以外，你确实会遇到一百万种不同的方式。

几年之后，我又听到鲍勃·塞格在《夜行客》[2]中唱道：“昨夜被雷声惊醒。雷声有多远？我想了又想。”我知道他是底特律人，但难道他没有参加童子军或在科学课上认真听讲吗？要知道打雷的地方距离多远，你不需要坐起来想了又想，只需要在看到闪电的一刻开始默数“一千零一，一千零二……”，直到你听到雷声的一刻为止。当然这样说有失公允，正如文字编辑莎拉·范波恩指出的那样，如果他真是被雷声惊醒，那么他可能并没有看到闪电。不论如何，这种数数方式非常接近于一次一秒，而声音的传播速度是大约每三秒钟一千米，因此如果你从看到闪电开始数，到听见雷声时刚好数完“一千零三”，你就知道闪电是打在一千米以外的地方。（在童子军营，我们还学到如果闪电和雷声几乎重叠，要马上卧倒，蜷成一团。郊区居民或许比城市居民更需要了解这些知识。）

伽利略也同样知晓类似的知识。我并不确定人们最早是从什么时候开始意识到声音的传播速度是可以很容易测算出来的，不过到了 17 世纪，随着大炮的增多，人们非常清楚听到炮声和看到炮弹爆炸之间存在一个时间差。在伽利略的《关于两门新科学的对话》[3]一书中，他提出简单模拟这一现象来测算光的速度。两人面对面站立，每人手中拿着一只光源，并都用手挡住。然后第一个人松开遮挡光源的手，当第二个人

看到光源后，也松开他的手。伽利略知道如果两人相隔的距离很短，效果会很不明显。因此，他们借助了新近发明的望远镜的帮助，使得参与实验的两个人可以相隔一段很长的距离。遗憾的是，尽管伽利略尽力去完成这一实验，但最终的距离并不足以使实验获得成功。光的运行速度实在太快，以至于在最远距离的实验中，光源传到对面所花费的时间仍然不足万分之一秒，而这一时间长度在伽利略的时代是无法被测量的。最终，伽利略的结论是：光的速度要么是无穷大，要么是非常非常快。

虽然实验没有成功，但伽利略的想法是对的。找一段足够远的距离，使得光需要经过一段能够被测量的时间才能从一端传至另一端，记录下时间，测量好距离，利用物体在匀速运动时的计算公式，用距离除以时间即为速度。尽管伽利略本人没能够完成这一计算，但他进行了一次科学史上最重要的观测之一，不仅彻底改变了人们对于宇宙的看法，同时也为光速的测算奠定了基础。

木星的卫星

通常认为，望远镜是由荷兰的镜片制造商汉斯・利伯希所发明的，他为此项发明申请了专利，并于 1608 年推向了大众市场。望远镜在当时最普遍的使用者是商人，他们需要及早发现海面上的船只，以便判断是否是敌人。1610 年 1 月 7 日，伽利略将一只望远镜对准木星，他观测到“三颗静的恒星，由于太小而肉眼不可见”[4]，它们挨着木星，且与木星呈一条直线。日后的观察又显示出这些天体以一种奇怪的方式运行，如果它们是恒星的话是不应该以这种方式运行的。在 1 月 10 日，他发现其中一颗“恒星”消失了，他正确地将此现象归因于该天体运行到了被木星遮挡住光线的位置。只用了几天的时间，伽利略就得出结

论，这些天体实际上是在围绕着木星运行。

这一革命性发现震撼了世界，因为既然存在天体围绕着其他星球转动，那么地球便不可能是宇宙的中心，而地心说是当时重要的神学基础。众所周知，这一发现将伽利略推向了天主教的对立面。或许是时代进步了，异端科学理论所面临的严重后果已经有所减轻。当乔达诺·布鲁诺在 1600 年提出太阳仅仅是无数恒星中一员的宇宙学观点时，他被活活烧死，而到了 1633 年，伽利略仅仅遭受了软禁的处罚。到了 1925 年，当约翰·托马斯·斯考普斯在田纳西州的课堂里讲授进化论时，所面临的处罚则只需要支付 100 美金的罚款即可。

伽利略对于木星卫星的发现，也为丹麦天文学家奥勒·罗默提供了一种估算光速的方式。意大利人乔凡尼·卡西尼通过对木卫食的观测发现，每次木卫食之间的间隔时间是变化的，随着地球与木星之间距离的缩短，这一间隔也在缩短，而随着距离的增加，间隔也在增加。卡西尼从以上观察所得出的结论是，当地球离木星较远的时候，光需要更长的时间才能抵达地球。他于 1676 年在法国科学院的一次会议上发表了这一论点。[5]他的结论是，太阳光抵达地球需要 10 ~ 11 分钟。当时，地球与太阳之间的距离已经有一个很好的测算结果，假设光从太阳抵达地球的时间为 10.5 分钟，那么光速就是 149 668 000 千米/(60 × 10.5)秒，即大约 237 568 千米每秒（差不多是我们今天所知数值的 80%）。卡西尼对这一成果似乎并不在意，很快就转向了其他研究领域。而罗默则对木卫一的木卫食现象进行了长达八年的持续观测，并发表了他的观察成果。正如卡文迪许 100 年前已经掌握了能够确定万有引力常数的数据，但并没有费心去把它算出来一样，罗默已经掌握了能够确定光速的数据，但也没有费心去算它。和卡文迪许一样，卡西尼和罗默两人都没有真正计算出基础常数的数值。但罗默被普遍认为是测算光速的第一人，

我猜其中的逻辑是，如果准备工作做得足够深入，他就应得这份荣誉。

在大约 50 年后，英国天文学家詹姆斯·布拉德利改进了罗默的估算结果。布拉德利所采用的天文测量法和罗默的相同，但观念上的革新使他能够更好地完成这项工作。布拉德利有一天驾船出海，看着桅杆上的三角旗随风飘动。不管他如何掌控船只，三角旗总是顺风摆动。布拉德利突然想到光也是一样的，不管地球怎么运动，光的方向不变。这个启发让布拉德利对于太阳光抵达地球所需的时间有了一个更好的估算，因而也得到了一个更准确的光速数据。他非常精确地提出太阳光抵达地球所需的时间为 8.2 分钟，这一估算比实际的光速大约快 1.2 个百分点。此后，再经过一个多世纪的时间，人类的科技水平才终于进步到可以真正测算光速。

魔镜魔镜告诉我

19 世纪中叶，两名法国物理学家采用了相似的解决方案，发展出了测算光速的新方法，也为一场深刻的物理学革命奠定了基础。第一项技术由阿曼德·依波利特·路易斯·斐索所设计，其设计是基于早先一位法国物理学家弗朗索瓦·多米尼克·阿拉戈的想法，因为阿拉戈的视力很差，无法自己开展他的实验。斐索将两面镜子相对安置，中间相隔 8633米。他在两面镜子中间放置了一个快速转动的齿轮，并对着轮齿之间的齿槽射出一束光线，然后通过调整齿轮的旋转速度，使得返回的光线恰好穿过下一个齿槽。当时科技的进步使得通过装置能将齿轮的转速控制在一个恒定的速度上，如果没有机器的控制是不可能做到这一点的。只要知道了齿轮的转速和齿轮上轮齿的数量，就能计算出经过的时间。斐索测算出的数值比实际光速高了五个百分点，但相对罗默的估算

仍然算是一个很大的进步。虽然他的结果没有布拉德利的准确，但他在实验中运用的技术革新为下一步获得更加精确的光速数值铺平了道路。在科学和数学领域（正如我对学生讲的），有些时候，计算方法比结果更加重要。

斐索的朋友莱昂·傅科也同样尝试解决这一问题，他使用的方法也和斐索的类似。这一点说来话长，两人自大学起就一直是很好的朋友，也曾考虑合作测算光速。但在一次争吵之后，两人分道扬镳，决定分别进行自己的实验。傅科所采取的方式同样是设置两面相隔一段距离的镜子，但他没有采取让光线穿过齿轮齿槽的方式，而是用其中一面转动的镜子来反射光线。傅科自己设计了一部蒸汽机来驱动镜子的转动。光线被反射至另一面静止的镜子，然后再被反射回来，而此刻这面转动的镜子已经缓慢改变了角度。斐索是运用齿轮的转动来记录光线往返所需的时间，而傅科则是通过记录返回的光线所偏离的角度来测算出经过的时间。

这个设备的某些部件是在两人决裂前就已经设计好了。另外，傅科还利用转动镜子的技术发现了光线在水中的传输速度比在空气中要慢。正如卡文迪许承认米歇尔在扭秤的发明过程中所起到的作用一样，傅科也承认了斐索的贡献，或者说差一点承认了吧。以下是傅科的原话：

> 旋转镜面、聚光透镜、连线以及千分尺都不是我发明的，但我有幸通过将其他科学家所设计的仪器以这样一种方式组合起来，解决了一个 12 年前提出的问题。[6]

看上去两人之间的矛盾仍未和解，但傅科已经体现出了学术诚信，他坦率地承认各项技术成果成就了他的实验。他觉得自己不只使用了斐索的旋转镜面，而且也使用了一些其他设备，因此无需特别提及斐索本人。

傅科的实验设备在斐索的基础之上作了改进，但遗憾的是，傅科无法保持光线集中，除非两面镜子的位置非常靠近。这又导致返回光线的角度变化非常小，从而使得测量结果的相对误差很大。后来，美国首位诺贝尔奖获得者也借鉴了傅科的基本结构，并通过一种新的方式改进了测量过程中的绝对以及相对误差。

阿尔伯特·迈克耳孙——测量光速的人

自古以来，画家们都在以令人惊艳和充满想象力的方式运用光线，比如丁托列托、乔治·德·拉·图尔、乔治娅·奥基夫（她特地搬到新墨西哥州居住，以便将当地独特的光线融入她的绘画之中）、托马斯·金凯德（自诩为“绘光画家”）。但在以光为媒介的人里面，最有资格的一位恐怕就是美国首位诺贝尔奖获得者阿尔伯特·迈克耳孙了，正如哈佛大学的威廉·皮克林教授在提名信中所写的那样：“您在测量光速以及运用光的干涉方面作出了伟大工作。”[7]

迈克耳孙的诺贝尔奖之路乃至最初步入光学研究领域都颇为曲折。他于 1852 年生于波兰小城斯切尔诺，后来全家人移居到美国，经过纽约和加利福尼亚辗转落脚在内华达州的弗吉尼亚市。青年时期的迈克耳孙已经是个明星人物，后来他被推荐到马里兰州的美国海军学院就读。

尽管有推荐，但他是否能赢得入学资格还不一定，那时可跟现在不一样。迈克耳孙前往华盛顿接受最后的面试，却发现面试者不是别人，竟是当时的美国总统尤利塞斯·格兰特。格兰特总统专心聆听了迈克耳孙的陈述，但最后却遗憾地告知他仅有的 10 个名额已经满了。格兰特总统建议失望的迈克耳孙去一趟学院，看是否有人最后无法登记入学。迈克耳孙等了三天，却徒劳无功。他怀着气馁得近乎心碎的心情登上返

回内华达的列车，正在这时，迈克耳孙突然听到有人叫他的名字，那是一位来自白宫的信使。原来，格兰特总统被迈克耳孙的陈述深深打动，在最后时刻终于决定为了他额外增加第 11 个名额。

这对于迈克耳孙来说是幸运至极，然而他在海军学院的学业仍然不是一帆风顺的。在光学、热力学之类的理论学科上，迈克耳孙在班级中都是名列前茅，但在航海技艺方面却落在后面，而后者无疑是成为一名职业海军官员所应掌握的核心技能。值得庆幸的是，在结束了见习船员的生活之后，他得以上岸工作，成为了海军学院的一名物理学与化学教员。

学校中的一位前辈教员威廉・桑普森点燃了迈克耳孙对于光学的热情。当时，学校安排迈克耳孙讲授一门高级物理课程，桑普森建议他在开始课程时运用一种新的教学技巧——课堂演示，并认为傅科利用旋转镜面测算光速的实验很适合进行现场演示。迈克耳孙对此也有同感，他了解这个实验，事实上，在他的最后一次物理学考试中就有一道题目是关于该实验的。

在演示过程中，迈克耳孙发现傅科的实验中有一个缺陷（法国物理学家阿尔弗雷德・考努也指出了同样的问题）。[8] 在傅科的实验中，两面镜子之间的距离太短了，以至于返回光线的偏差不足一毫米，因而测量过程的误差就会导致光速的计算产生过大误差。迈克耳孙认为，增加两面镜子间的距离能够大大改进测算的精准程度，另外，将傅科实验中静止的镜子替换为平面镜也会进一步改进实验效果。迈克耳孙着迷于该实验的美妙之处以及实验得出重大改进结果的可能性，甚至自己破费了 10 美元买来了一面平面镜。迈克耳孙共进行了 10 次实验，然后取各次实验结果的平均值，最终得出的光速数值为 300 157 千米每秒。

不久之后，迈克耳孙又得出了更精准的测算结果。几年前，迈克耳孙迎娶了一位富有的纽约律师的女儿玛格丽特·海明威。老丈人在劝说之下向海军学院捐赠 2000 美元，用来改善迈克耳孙的实验设备。经过数年努力，迈克耳孙进一步将测算结果推进至 299 509 ± 50 千米每秒。

迈克耳孙对于光学研究的热情伴随了他的一生。技术的进步，包括他自己为改进微距测量的效果而发明的干涉仪，不仅帮助他持续改进测算结果，而且也引出了对物理学发展具有深远影响的一个实验。

迈克耳孙-莫雷实验

根据迈克耳孙时代通行的理论，宇宙中弥漫着一种不可见、没有重量的物质，它有一个诗意的名称，叫做“光以太”，其扰动就产生光波。而光波是真实存在的，英国科学家托马斯·杨在他的双狭缝实验中证明了这一点。[9]简言之，人们相信以太对于光的作用就像空气对于声音的作用一样，必须通过前者，后者才能够传导。这一假说引发出一个关键推测：如果光以太的确存在，那么地球围绕太阳运行时，运行速度应该是不同的，因为光线的角度不同，这就和游泳的人顺水游动时速度最快是一个道理（迈克耳孙在向他的孩子们解释这一观点时就使用了这个例子）。为了测量其中速度的差异，迈克耳孙和克里夫兰市现在叫做凯斯西储大学的教授爱德华·莫雷共同打造了一个非常精妙而概念上十分简单的实验（图 3）。

迈克耳孙-莫雷实验将一束光线劈开，分成两条相互垂直的光线，分别射向两面镜子，镜子距离光线分开的点的距离相同。如果以太的确存在，那么两束光线反射回来时速度会不同，两束光波之间就会产生干涉条纹。迈克耳孙采用了被称为干涉仪的仪器，目的是测算出两束返回

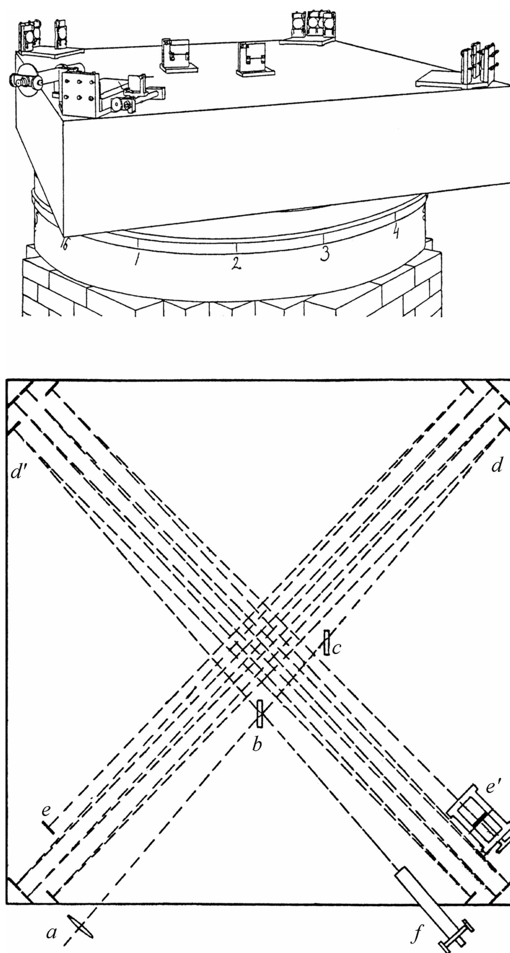


图 3　迈克耳孙-莫雷实验。上为侧面图，下为平面图，其中 *a* 为光源，*b* 为利用反射和透射“劈开”光线的分光板，*c* 为用来确保两束光线具有相同光程的补偿板，*d*、*d*′、*e* 为反射镜，*e*′为可以微调的反射镜，*f* 为望远镜（来源：*American Journal of Science*，vol. 34，pp. 337 ~ 338，1887）

光波的速度差，以便测算地球在太空中运行的速度。但由于干涉仪过于灵敏，即使有人在两米开外的地方跺脚，也会对实验效果产生影响，导致实验失败。干涉仪和分光板都被放置在一块浮于水银池的大理石板上。我们可以想象，这整个装置就像印第安纳·琼斯踮着脚尖踏入一座黑暗的山洞所要寻找的无价之宝。实际上这一设计是为了避免整个设备受到干扰，同时由于石板可以在水银池上转动，从而可以得到不同方位下的结果。据阿瑟·爱丁顿称，该装置对于光线返回时间差的测量，能够精确到十万亿分之一，在这段时间中，光线的运行距离不到千分之三厘米。

最终的实验结果震惊了整个物理学界，不管他们怎么频繁地重复该实验，光波返回的时间都一模一样。这个结论令人难以接受，任何方向上的光速都一模一样，简直就像是告诉人们不管一名游泳者是顺水还是逆水游动，泳速都完全一样。

从该试验中能得出多种可能的结论，其中最常被人们引述的就是：由于不管以何种角度调整光线都无法测出速度差，因此光以太并不存在；如果光以太存在，就应该在某种情况下，呈现出能被测量到的速度差。而爱尔兰物理学家乔治·菲茨杰拉德则从迈克耳孙-莫雷实验的“无功而返”中得出了一个令人惊讶的结论。他提出了一个颇为奇怪的假说：在空间中运行的物体会沿着运行的方向收缩其长度，以确保两束光线在同一瞬间返回。该现象被称为菲茨杰拉德收缩，有首打油诗写得诙谐：

昔有剑手名菲丁，
身躯矫捷手如电。
不期收缩效应灵，
长剑顿缩成铁饼。

荷兰物理学家亨德里克·洛伦兹运用代数算法将该现象量化为了一个公式，称为洛伦兹变换。在狭义相对论中，爱因斯坦通过两个原理也可以推导出洛伦兹变换。一个是，在所有参照系中，光速都是恒定、匀速的（这也是迈克耳孙-莫雷实验的另一个可能的结论）；另一个是相对性原理，即在所有参照系中，物理定律有相同的表达形式。

尽管迈克耳孙的工作主要围绕光明的光而展开，但在他的生命中也有着一些黑暗的篇章。在迈克耳孙所处的时代，教授，特别是知名教授，在民众中也是小有名头，这一直延续至 20 世纪的早期。当时迈克耳孙雇用了一位美丽但头脑相对简单的女仆，这位女仆受人利用，指控迈克耳孙引诱（这一指控现在已经很少见了）、侵犯并殴打她，以向迈克耳孙勒索钱财。丑闻随即曝光，不过迈克耳孙最终得以安然脱身。但更糟的还在后头。和众多前沿领域中的天才一样，迈克耳孙也是个工作狂，这最终导致他的精神崩溃婚姻解体。尽管他之后再娶，但离婚的苦痛一直萦绕着他。在那之后，他便再也没有与前妻及孩子联络过，也不再提及他们。他的才华受到学生和同事的仰慕，但他难以掌控的性格也使人望而却步。他喜欢绘画和作曲，但这些爱好都未能帮助他缓和自己呈现在世人面前的严苛形象。他共事多年的研究助理如此总结道：“人类普遍的情感，如爱恨、嫉妒、羡慕和野心，似乎都无法打动他。他对所有人呈现出一种惊人的漠不关心。”[10] 尽管如此，在探讨光的本质和属性方面，他却充满热忱。他的女儿曾经提及，当有人问他为何用尽一生来研究光时，他的面色顿时一亮，回答道：“因为它如此有趣。”[11]

比光子更快

光速之所以如此有趣的部分原因在于，它不仅是宇宙中一个基础常

数，同时也是宇宙中所有速度的上限。没有什么能比光速更快，甚至信息也无法快过光速，而任何有质量的物体都不可能与光并驾齐驱。

不过，让我们把这个结论弄复杂一点。假设有一座灯塔坐落在离海滩不远的一些岩石上面。海滩后面有一条防波堤。随着灯塔上灯光的转动，光会照到防波堤上。这时灯光看上去像在防波堤上移动：当光线与防波堤垂直时移动得慢，而当光线与防波堤渐趋平行时就移动得快。有趣的是，尽管我在前面说光速是最快的，但在这里，只要创造出合适的前提，我们可以很容易推导出以下结论：光线沿着防波堤移动的速度比光速本身更快！

讲一道几何题目大家就清楚了。这时只需用到勾股定理，即直角三角形两直角边边长的平方和等于斜边边长的平方。现在让我们假设灯塔位于 L 点，灯塔与防波堤之间的距离为 R，Y 代表防波堤上距离灯塔为 R 的那一点。在未来的某个时间点，光线会抵达防波堤上的 X 点，假设 X 和 Y 之间的距离为 d。这样 X、Y 和 L 三点便构成一个直角三角形，两个直角边的长度分别为 R 和 d（图 4）。

假设在 $t=0$ 的时刻，灯塔发出一道光线照向 Y 点。由于时间 = 距离/速度，所以当光线抵达 Y 点时，$t=R/c$（通常用 c 来表示光速）。同时，假定灯光转动四分之一周需要 q 秒时间。因此当光线转动照向 X 点时，所花费的时间一定小于 q 秒。当光线照向 X 点时，光线将沿直角三角形的斜边 LX 运行，距离为 $\sqrt{R^2+d^2}$，所花费的时间为 $\sqrt{R^2+d^2}/c$ 秒。那么光线会在 $t=q+\sqrt{R^2+d^2}/c$ 时刻之前照到 X 点。这意味着光线从 Y 点移到 X 点，经过 d 距离所花费的时间小于 $s=q+\sqrt{R^2+d^2}/c-R/c$ 秒。要使光线划过这一距离所花费的时间小于光经过这一距离所需的时间，

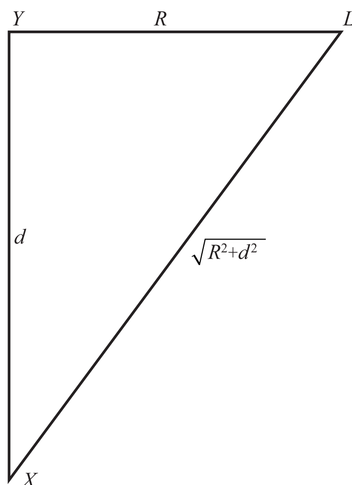


图 4

那么必须要有 $d/s>c$。在不等式两边乘以 s，可得到以下公式：

$$d>(q+\sqrt{R^2+d^2}/c-R/c)c = qc+\sqrt{R^2+d^2}-R$$

变换一下位置可以得到以下不等式：

$$R-qc>\sqrt{R^2+d^2}-d$$

现在运用另一个技巧，在不等式的两边都乘以 $\sqrt{R^2+d^2}+d$，即运用 $a-b$乘以 $a+b$ 得到 a^2-b^2的方法。在本例中，不等式变成下面这样：

$$(R-qc)(\sqrt{R^2+d^2}+d)>(R^2+d^2)-d^2=R^2$$

要使以上不等式成立，我们必须确保灯光旋转的速度非常快，使得不等式左边的数值为正数（要做到这一点，可以选择一个速度，使得

$q < R/c$)。一旦如此，我们只要选择 d 的数值，使得$(R - qc)(2d) > R^2$即可（由于直角三角形的斜边永远大于任意一条直角边，所以 $\sqrt{R^2 + d^2} + d > 2d$)。因此，只要一开始能够选择一个灯光旋转的速度，使得 $q < R/c$，并选择一个 d 的数值，使得：

$$d > R^2/(2(R - qc))$$

那么便创造出一种情形，这时光线沿着防波堤划过的速度大于光速本身。

为了更好地理解这种情形所需的速度和尺寸，让我们来看一个实际的例子。汽车车轴的转速一般最快可以达到6000rpm，即每秒转 100 圈。那么转四分之一圈则需要1/400 秒。我们假定 $q = 1/400$ 秒，而光速大约为300 000千米/秒，所以 $qc = 300\ 000/400 = 750$ 千米。我们还需要一个 $R > qc$，那么就姑且假定 $R = 800$ 千米（好吧，看来灯塔离海滩有点远)。然后我们需要一个 d，使得 $d > 800^2/2(800 - 750)$，大概要大于6400 千米（好吧，这沙滩也有点长，比我住处附近的加州长滩还要长)。

如果你希望改进这个算法，使数字更加精确，至少有两种可以努力的方式。通过经验我们知道，灯光转动至接近四分之一周，即光线与海滩接近于平行时，光线划过海滩的速度会越来越快，所以我们可以计算出 ZX 区间内的平均速度，Z 指的是非常接近 X 的一个点（这里并不需要掌握三角学知识，但有三角学的基础算起来会更加容易)，或者算出光线划过 X 点时的瞬时速度（这里则需要懂得微积分的知识)。

不要以为以上情形违反了光速最快的原则。光线与防波堤的交点既不是实体也不是电磁波，可以说只是一种数学上的构造。如果不用灯光，而换成油漆喷射器，那么沿着防波堤移动的是始自 X 点的一条油漆线的尾端，而并非单独的油漆颗粒以那种速度运行。假如仍以灯光为例，可以在

防波堤上装满传感器，这样传感器就能永久记录下光子的冲击，留下类似的油漆线。最后要说的是，在不等式 $d/(q+\sqrt{R^2+d^2}/c-R/c)>c$ 当中，左侧的 c 代表的是光线从灯塔抵达海滩的速度，右侧的 c 则代表沿着海滩运行的光的速度，即我们试图超越的速度。如果将左侧的 c 换成油漆的速度 p，我们将得到以下不等式：$d/(q+\sqrt{R^2+d^2}/p-R/p)>c$。即使 p 值比 c 值小很多，这个等式依然可以成立，但这时必须使灯塔的位置离海滩更远，同时大大延伸海滩的长度。没有什么比光速更快，但如果你一定要找那个“没有什么”，那这个就是了！

注释

[1] 可参见 http://www.elyrics.net/read/d/doors-lyrics/the-crystal-ship-lyrics.html（2011 年 1 月 17 日有效）。

[2] 可参见 http://www.elyrics.net/read/b/bob-seger-lyrics/night-moves-lyrics.html（2011 年 1 月 17 日有效）。

[3] Galileo Galilei, *Two New Sciences* (Madison: University of Wisconsin Press, 1974), 50。

[4] S. Drake, “Galileo's First Telescopic Observations,” *Journal of the History of Astronomy* 7 (1976): 157。

[5] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Rømer's_determination_of_the_speed of light（2011 年 1 月 17 日有效）。

[6] 可参见 http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Foucault.html（2011 年 1 月 17 日有效）。

[7] R. Staley, *Einstein's Generation: The Origins of the Relativity Revolution* (Chicago: University of Chicago Press, 2008), 212。

[8] D. Livingston, *The Master of Light* (New York: Charles Scribner & Sons, 1973), 51。

[9] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment（2011 年 1 月 17 日有效）。这是科学史上最重要的实验之一。

[10] D. Livingston, *The Master of Light* (New York: Charles Scribner &Sons, 1973), 5。

[11] T. Ferris, *Coming of Age in the Milky Way* (New York: Harper Perennial, 2003), 180。



第 3 章

理想气体常数

今日的科学工作包括观察、实验和理论研究，但古时候则不是这样。比如在古希腊，当时几乎没有什么实验手段，所以被称为哲学家的科学家们只能通过观察和理论研究来解释宇宙及其中的万事万物。米利都的泰勒斯是最早的先驱者，他第一次成功预测了日食，而且被认为是作出了几何学中的第一条证明：对顶角相等。泰勒斯提出了一切事物都源于并依赖于水的理论。在此基础上经过约一个世纪的精心构建，恩培多克勒集其大成，宣称一切事物都是由四种元素通过混合与分离而成，这四种元素是土、空气、火以及水；而混合与分离的过程是在两种力的作用下进行的，恩培多克勒将其称为“爱”与“恨”。

似乎站在 21 世纪的立场来看，以上观点颇为原始，但它们并非全无道理。比如，物质有四种状态：固体（对应土）、液体（对应水）、气体（对应空气）、等离子体（对应火）。虽然我不想引申过度，但作为化学作用本质的电磁力可以被视为“爱”（异性电荷或磁极相吸）和“恨”（同性电荷或磁极相斥）。而留基伯和德谟克利特早在公元前 4 世纪就开创了原子论，对于宇宙及其中的万事万物的解释已经相当到位。科学在进步过程中抛弃了大量错误猜测，并将正确的认识保留了下来。鉴于当时的科学家手中并没有多少可用的工具，这些正确的认识已经实属难得。

两千年后，在 17 世纪的欧洲，哲学家的后人们（此时被称为自然哲学家）在观察与理论研究之外，还发展出了一些实验的方法。是时候对自然“动手动脚”了。

多数科学家应该都会同意以下这个实验的定义：实验是进行有效控制下的测试或调查。最早的实验出现在何时尚存在争议。17 世纪早期，伽利略曾经通过圆球沿斜坡滚落的实验得出结论：物体在重力作用下的

运行距离与时间的平方成正比。数十年后，安东尼·范·列文虎克开始把所有的一切都放在显微镜下观察，不是比喻而是真真正正的所有一切。但最终是由列文虎克同时代的罗伯特·玻义耳发展出了如今被我们视为实验精髓的方法论：变动一项参数，然后观察其他参数会产生什么变化。他把在试验中使用的设备、涉及的流程、观察到的数据都一一记录了下来，从而为实验科学奠定了坚实的基础。

物理学定律通常以数学公式的形式（一般为等式，偶尔也会有不等式），来描述几个相关参数之间的变化关系。要得出这样一个定律，必须要能够观察参数的不同变化。在四种物质状态中，气体的变化是最容易观察和测量的，液体和固体则没有那么大的变化（至少，基于 17 世纪不够敏锐的测量设备是如此），而等离子体作为一种物质状态在当年还不为人所知。因此，显而易见，首条物理学定律会从气体中得出，而这正是玻义耳的着手之处。

但他并非这一领域唯一的研究者。1643 年，意大利物理学家埃万杰利斯塔·托里切利发现空气压力能够支撑起一段 76 厘米高的水银柱，并发现气压是会改变的。这一点启发了德国科学家、同时也是当时马德堡市市长的奥托·冯·格里克，冯·格里克发明了世界上第一个真空泵。为了展示气压的强大力量，冯·格里克设计出我们现在所知的马德堡半球。他将两个直径大约 50 厘米的半球对接在一起，并用真空泵抽走球体内的空气，然后在球体的两边各安排 15 匹马进行拉拽。这时球体无法被拉开，而在解除真空状态后球体却自然分开来了。

要计算出需要多大的力才能分开球体并不难。1 平方厘米面积上受到的空气压力约为 10 牛顿，而一个半径为 R 的球体的表面面积为 $4\pi R^2$。假定球体半径为 25 厘米，那么要分开两个半球，则需要

$4 \times 3.14 \times 25^2 \times 10 = 78\ 500$ 牛顿的力，这相当于 8 吨的物体产生的压力。

有人或许会对以上计算还有疑问，那么不妨亲自做一个简单的实验。首先在一只小玻璃杯中装满水，再找一个和杯口大小相当的塑料盖子（纸盖子不行，因为纸吸水会变软），同时要确保盖子原先是干燥的。将盖子盖在玻璃杯上，然后将杯子倒扣过来。如果空气的压力大于水的重量，盖子就会留在玻璃杯上，不会掉下来！

当玻义耳了解到冯·格里克的实验之后，他决定打造一个更简单的真空泵。冯·格里克所设计的泵需要两个人才能操作，而玻义耳的改进版则只需要一个人。玻义耳对于空气属性的研究最初发表在《空气的弹性和重量》[1] 中。在 1660 年的第一版中，玻义耳通过在一间空气逐步稀薄的房间内敲钟的实验，证明声音无法在真空中传播，同时他也证明空气不仅是生命的必需，对于蜡烛的火焰也是如此。在 1662 年的第二版中，玻义耳给出了气压和体积之间的关系，也就是我们在物理学和化学的入门课程中都会学到的玻义耳定律：在气温不变的前提下，气压与体积成反比；也就是说，假设气压为 P，体积为 V，则会有一个常数 k，使得 $PV = k$。

玻义耳很幸运有一位罗伯特·胡克这样的实验助理。胡克是众多实验助理中第一个发展出自己杰出科学事业的一位。通过在玻义耳实验室工作，胡克学到了玻义耳的方法论，并借此提出自己的胡克定律（在弹性范围内，物体的形变跟引起形变的外力成正比）。他进行这项研究或许是受到了玻义耳的空气弹性观念的影响。胡克还作出了科学史上最重要的发现之一。1665 年，胡克将栓皮槠切片放在显微镜下观察（图 5），发现栓皮槠是由一个个细胞构成（胡克觉得这些相互隔绝的组织很像修道院中修道士居住的小屋，因此将之命名为 cell）。[2]

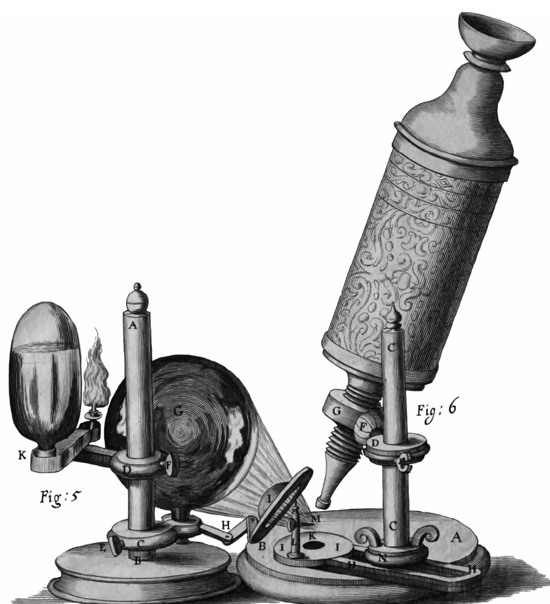


图 5　胡克的显微镜（来源：*Micrographia*，1665）

对于胡克在玻义耳定律发现过程中所起的作用，历史学家之间存在分歧。胡克可能进行了部分实验。有一位历史学家[3]认为，因为胡克是一位优秀的数学家，而玻义耳不是，所以可能是胡克发现了玻义耳定律的数学表达。不管怎样，玻义耳和胡克对于彼此都十分尊重，玻义耳也并未阻碍胡克的发展。当新成立的英国皇家学会寻找一位实验负责人时，胡克凭借在会员中的声誉毫无异义地得到了这一职位。

不论玻义耳定律最终归功到谁头上，玻义耳无疑是当时最重要的科学家之一。他的影响不仅限于物理学上的玻义耳定律、他在空气研究中的发现以及他对于化学的卓越贡献。玻义耳首次建立起的实验科学的基本方法，影响了后来众多的科学家，其中便包括牛顿。

约翰・道尔顿

虽然决定气体物理状态的只有三个变量——压强、体积及温度，然而在玻义耳定律提出一百多年以后，人类才发现了温度与体积之间的关系。原因很简单，在 17 世纪，人们还无法测量温度。一旦测量温度的工具被发明出来，几位著名的科学家便试图弄清这两个变量之间的关系。

其中就有科学史上最重要的人物之一约翰・道尔顿。人们提起道尔顿，一般会想到的是他的原子论：物质的基本构成是原子，化合物是由一种元素的原子和另一种元素的原子组合而成的。道尔顿也研究了气体的温度与体积之间的关系，并得出结论认为，在压强不变的情况下，气体依照先前温度下的体积随温度以固定比例膨胀。[4] 道尔顿作为一位十分严谨的实验家，在这里却有些粗心，因此得出了错误的结论。虽然在说明气体的膨胀率是其体积的固定比例上他是正确的，但说膨胀是按照先前体积的固定比例来进行则是错误的。

为了理解道尔顿的结论，不妨假定道尔顿的固定比例是百分之一每摄氏度，即在压强不变的前提下，气体温度每升高一摄氏度，便会在先前体积的基础上膨胀百分之一。假设 0 摄氏度时，气体的体积为 10 000 立方厘米。以百分之一作为膨胀率，那么当气体的温度升高至 1 摄氏度时，气体的体积将膨胀至 10 100 立方厘米。如果气体继续升温至 2 摄氏度，气体体积则会膨胀 10 100 立方厘米的百分之一，即达到 10 201 立方厘米。如果把气体换成钱，我们可以看出来，道尔顿对于气体热膨胀的结论与银行的复利一样——多出来的 1 立方厘米，即 10 100 的百分之一与 10 000 的百分之一的差异，就是利滚利。

不过，这里面有一个问题，在各种文献中似乎没有被特别提及。当然，我算不上是个历史迷，无法对这段历史作全面考察，所以没准已经有人（甚至可能道尔顿本人）已经认识到了问题的严重性。复利的多少取决于在一年内计息周期的次数。所有学过中级代数的学生以及（我希望）所有商科专业的学生都学过一个公式：$A = P(1 + r/N)^{Nt}$，其中 P 为本金、r 为年利率（表示为小数形式）、N 代表每年的计息周期次数、A 则代表 t 年之后的存款金额。

假设本金为 10 000 元，按照利率为 0.01、一年计息一次，则一年后的金额为 $1.01 \times 10\ 000 = 10\ 100$ 元。但如果把计息周期设为半年，0.01 的利率就要分到两个半年的周期中。半年后的金额为 $1.005 \times 10\ 000 = 10\ 050$ 元，而一年后的总金额则为 $1.005 \times 10\ 050 = 10\ 100.25$ 元。我们也可以通过上述公式来计算，其中 $P = 10\ 000$、$r = 0.01$、$N = 2$、$t = 1$。如果我们认同道尔顿的气体膨胀率与先前温度下的体积成正比的结论，那么我们就会遇到一个问题，即通过以上两种不同计算方式会得出不同的结果。一种是一步到位，从 0 摄氏度升温至 1 摄氏度，然后计算出气体的体积（类似于按一年计算复利）；另一种则是分成两步，先计算出温度从 0 摄氏度上升到 0.5 摄氏度时的气体体积，再计算出温度从 0.5 摄氏度上升到 1 摄氏度时的气体体积（类似于按半年计算复利）。我们是要采取哪种方法呢？

更糟的是，我们还可以分成三步、四步甚至几百步来算，而最后都会得出各不相同的结果。但也有一种解决方案（再次声明，我没见到有人提及这一点，也可能是由于我对历史的钻研不够）。如果计算复利的周期持续缩短下去，每个月、每一天、每个小时、每一秒、每一纳秒……所算出的一年后的金额会慢慢变大，但这种增大只会增加到一定的数值。事实上，它会根据被称为 PERT 的公式进行指数式增长。假定

本金 P 存入银行 t 年、年利率为 r 并且计息周期是连续的（即周期无限小，小于纳秒，小于皮秒，一直下去），那么年末的金额 $A = Pe^{rt}$，其中 e 为自然对数的底数。根据相应的气体的 PERT 公式（得名自上述等式的右半部分），通过初始的气体体积 P、上升的温度 t 以及尚未确定、需要通过实验和测算来确定的自然常数 r，就可以计算出最终的气体体积 A。

当银行的复利计息周期为无限小时，只要知道本金数额、银行利率、存款期限，便可计算出最终的金额。而当存款设定为一定的计息周期时，我们不但要知道以上所有数据，还要知道具体的计息周期，才能计算出最终的金额。类似地，当气体在一定的压强下膨胀时，根据 PERT 公式，要计算出最终的气体体积，需要知道初始的体积、作为自然常数的膨胀率（类似于银行利率）以及开始和结束时的温度。如果气体按照一定周期进行膨胀，那么最终的体积除了取决于以上所有数据，还取决于加热的过程——是持续升温，还是一次升温一摄氏度，或者其他情况。这一困境是由道尔顿的气体膨胀定律逻辑推演而来的。若膨胀定律服从 PERT 公式，本可以脱离这一困境，但从实验中无法推导出这一关系。

从连续复利中得出的 PERT 公式是指数式增长（或衰减）的一个例子，而后者是自然界中普遍存在的现象。当个体的增长（或衰减）率与个体总量成比例时，便会形成指数式增长（或衰减）。我开始执教于 20 世纪 60 年代，当时《星际旅行》（有柯克船长和斯波克大副的那版）在校园里受到狂热的追捧。其中一集非常有意思，叫做《特里波利的麻烦》，特里波利是一种可爱的毛茸生物，其繁殖速度非常快，以致不久之后，整个“企业号”上到处都是特里波利。正如飞船上的医生伯恩斯・麦考伊所说，它们繁殖速度之快，仿佛一出生就已经怀孕了。如果

一开始有双倍的特里波利，就会生下双倍的小特里波利，依此类推。讲课时，我曾以特里波利为例，来说明指数式增长；我甚至带了几个休眠的特里波利去课堂上。（实际上那是我从附近的药店买来的粉扑，《星际旅行》的那个时代还没有电脑特效，片子里的特里波利看上去简直和粉扑一模一样。）放射性衰减的情况也相似。你可能觉得“知识呈指数式增长”是一种说法而已，但如果知识的获取比率与原有知识总量成比例的话，这种说法其实是种很实在的表述。

不论如何，这一点说明道尔顿的结论存在问题。就像随着本金的利滚利，越往后利息会越来越多，道尔顿的结论也会导致气体随着气温的升高而膨胀得越来越厉害。但是在实验中，这样的结果并没有出现。这一问题最终在 18 世纪初由两位航空领域的法国先驱者解决。

法国气球飞行家

恒压情况下气体膨胀定律的准确公式最终由两位法国人发现，他们是雅克·亚历山大·塞萨尔·查理和约瑟夫·路易·盖-吕萨克。两位都是科学家，但各自又都是因为对 18 世纪晚期处于前沿的热气球技术感兴趣才开始研究气体膨胀。气温升高会导致气体膨胀，但膨胀过头就会导致气球破裂，造成惨剧。因此了解气体膨胀的幅度能帮助避免此类状况发生。盖-吕萨克的兴趣并不止于气球本身，他对于高空处的空气属性也充满了研究兴趣。1804 年，他和同伴乘热气球升到了 7000 米的高空[5]，并测量了不同高度空气的温度和湿度，这可能也创造了那个时代的世界纪录。尽管当时吉尼斯纪录还不存在，没有如今这样的验证机构，不过在之后的近半个世纪内，似乎都没有人超越该纪录。

查理和盖-吕萨克两人都发现自然并没有对热膨胀安排“利滚利”；

相反，气体在恒压情况下加热时只会得到简单的“利息”。他们的结论正好与道尔顿的结论形成了对比。两者的本金都是指 0 摄氏度时的体积。如果膨胀率是百分之一每摄氏度，那么当气体从 0 摄氏度加热到 1 摄氏度后，通过两种理论得出的气体体积都是 10 100 立方厘米。但查理和盖-吕萨克指出，当温度从 1 摄氏度提升到 2 摄氏度后，气体的膨胀率仍然是 0 摄氏度时体积的百分之一，即体积从 10 100 立方厘米增加到 10 200 立方厘米。

当然，以上计算并不准确。我以百分之一为例只是为了方便计算，事实上盖-吕萨克所推算出的数字是，气体每升温 1 摄氏度就会膨胀 0 摄氏度时体积的 1/266. 67。这一膨胀率和我们今天所了解到的膨胀率 1/273. 15非常接近，充分说明他作为实验科学家的高超能力。

这一结论有时被称为盖-吕萨克定律，但更常见的叫法是查理定律，而这也要归功于盖-吕萨克的努力！查理早于盖-吕萨克 15 年得出他的结论，但盖-吕萨克在记录结果方面做得更加细致和精确，更严格遵从了科学家和数学家的常规方法（查理并未做到这点），并且他发表了他的研究成果。[6] 同时他也承认查理做过类似实验，对此作出了贡献。因此，一些人也将这一恒压情况下的气体热膨胀定律称为查理-盖-吕萨克定律。

合二为一

到了 19 世纪初期，科学家已经有了两条有关理想气体状态的定律。玻义耳定律指出在气温不变的情况下，压强与体积之间的关系为 $PV = k$（k 为一定数值的常数）。而查理定律，或者说盖-吕萨克定律表达的是在压强不变的情况下，气体的绝对温度和体积的关系为 $V = Tk'$，k'同样也

是一个常数，但和玻义耳定律中的常数 k 并不相同。

直到 19 世纪 30 年代中期，物理学家艾米利·克拉珀龙才将两个定律合二为一，组成我们今天所知的理想气体状态方程。对此我颇为不解，因为在我看来以上两个定律之间的关系是相当明显的。在玻义耳定律中，等式右侧的常数 k 会根据不同的绝对温度 T 而有所不同，因此我们可以把它看做是 T 的函数，即 $f(T)$。如此，便可将玻义耳定律重新写为 $PV=f(T)$。

同理，在查理定律中，等式右侧的常数 k' 也会根据不同的压强 P 而有所不同，因此我们可以把它看做是 P 的函数，即 $g(P)$。如此便可将查理定律写为 $V=g(P)T$。

下面就该运用（非常）简单的代数了：$f(T)=PV=Pg(P)T$。在等式 $f(T)=Pg(P)T$ 两边都除以 T，便得出了所有 T 数值和 P 数值的关系：$f(T)/T=Pg(P)$。而等式的左侧 $f(T)/T$ 完全取决于 T 的数值，等式的右侧 $Pg(P)$ 则完全取决于 P 的数值。假设我们现在让气体的压强保持不变，使 $P=P_0$，然后为气体加热。如果左侧的表达式 $f(T)/T$ 数值发生改变，那么右侧的 $P_0g(P_0)$ 也将得到不同的数值，而根据假设这一点显然是不可能的。因此，$f(T)/T$ 的数值必须是恒定的，不妨设为字母 a，即 $f(T)/T=a$，于是 $f(T)=aT$，那么玻义耳定律就变成了 $PV=f(T)=aT$。[7]

简单思考一下，我们就知道等式右侧的常数实际上并不是一个常数，它取决于在实验一开始共有多少气体。如果建造一个大容器，并用可移除的隔板将容器分成两个大小相同的隔间，在两边分别开展相同的实验，这时气压 P、温度 T、体积 V 都相同。然后移除隔板，这时气压

P 和温度 T 都不会有变化，体积 V 则会加倍。通过 $PV = aT$ 可以得出 $P(2V) = 2PV = 2aT$，显示出随着体积加倍，等式右边的常数也加倍了。类似地，如果将容器分为三个体积相同的隔间，我们就会看到随着体积变为原来的三倍，等式右侧的常数也会变成原来的三倍。因此，等式右侧的常数取决于一开始共有多少气体。这一点体现在最终的理想气体状态方程中，即 $PV = nRT$，n 在此代表气体的量，通常以摩尔为单位（对于没见过或忘记了这个单位名称的读者，在后面的阿伏伽德罗常数一章中我们会对此进行介绍），R 就是理想气体常数。

统计力学和理想气体状态方程

物理学和其他科学一样，不只要寻求真理，同时也要寻求对于真理的解释。虽然理想气体状态方程来自玻义耳定律和查理定律，但这两条定律都是经验定律，均源自实验、观察及测量。科学家的目标，就像牛顿对于开普勒定律的解释一样，不仅是要建立起对于自然的经验式陈述，同时也要有一个理论框架来解释这一陈述，并以此来准确预测在实验中将会观察到的情况。随着统计力学的发展，在 19 世纪下半叶，人类对于气体状态的了解有了跨越式的进展。

统计力学是概率论（数学的一个分支，其中包含统计学）在热力学上的运用，它将理想气体视为数量庞大的微粒（气体原子或分子）的集合，并且微粒的位置和速度全部遵循概率分布。我们并不能把握具体某个气体分子每时每刻的位置，但可以假定在任意一个时刻，它在玻璃瓶中的位置是随机的，即它靠近瓶口或靠近瓶底的可能性完全相同。运用一些数学工具（如散度定理，这是多元微积分中最重要的内容之一）以及物理学工具（如牛顿力学定律、哈密顿方程以及能量均分定理[8]），

可以从统计力学的假设中推出理想气体状态方程。这样就为理想气体状态方程奠定了坚实的理论基础（如果可以用坚实一词来形容的话），与开普勒第一定律一样。

从实用的角度来看，更整合的科学理论有很多好处，它们不仅能指明新技术的方向，同时也帮助科学家在不进行实验的情况下，就能够判断事物的状态变化。当然，要想验证这些预测，还是要通过实验。从认识论（这是我近 70 年来首次使用这个词，以后恐怕也不会再用到了）的角度来看，更整合的科学理论能够推开无知之幕，虽然可能做不到完全将其消除。通过证明开普勒第一定律是牛顿的万有引力理论在数学上的推论，“为何行星沿着椭圆轨道围绕太阳运行，而且太阳位于椭圆的其中一个焦点上”这个问题就被另一个问题所替代，即“为什么两个物体之间的万有引力作用在一条直线上，并且与两个物体质量的乘积成正比，与两者之间的距离平方成反比”。爱因斯坦期望通过建立一套统一场论来消除无知之幕，而现代物理学家则希望通过一套万有理论来实现这一点。

对此我持怀疑态度。写作这样一本书的一个好处就是我可以时不时地加入自己的看法。我认为只有在宇宙大爆炸之后极微小的、所有的力都统一在一起的瞬间，才会有一个适用于一切事物的简单解释，而那也是我们最后一次机会。许多现象可以被解释为符合某种模式，但我不认为这些解释的模式又有其自身的模式，可以一步步归结到一个解释一切的简单模式之中。我同意理查德・费曼的看法，如果确实如此的话，整个世界将无比美好。但我认为作为一个整体的宇宙就像费曼所说的洋葱，人类需要一层层地将表皮剥去以后，才能发现深藏其中的真相。或许物理学存在一定的统一性，但那只是因为物理学所研究的现象相对于复杂的化学、细胞生物学或人类的大脑来说，是极度简单的。一旦加入

丝毫的复杂性，几乎所有一切一下子变得不可预测，或者说不再简单了。

当然，物理学家（或其他人）并不会因此就停止寻找一个这样的解释，支持他们寻找下去的原因与支持阿尔伯特·迈克耳孙耗费大量时间和精力测量光速的原因一样——因为它如此有趣。

注释

[1] R. Boyle,“The Spring and Weight of the Air” in *The Works of Robert Boyle Vols. 1~7*, eds. E. Davis and M. Hunter (London: Pickering and Chatto, 1999)。这是套严肃的学术研究，并不好读。因此，花将近 600 美元买其中的 8 ~ 14 卷（整套书似乎已经绝版）去读，还不如买张折扣机票飞到英国，到剑桥大学的惠普科学史博物馆参观玻义耳的专区，整个行程下来大概也就那么多钱。

[2] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Hooke（2011 年 1 月 9 日有效）。

[3] Robert Gunther, ed., *Early Science in Oxford*, *privately printed*。见于注 2 中的参考文献。

[4] M. Crosland, *Gay-Lussac: Scientist and Bourgeois* (Cambridge: Cambridge University Press, 1978), 7。

[5] 可参见 http://www.chemistryexplained.com/Fe-Ge/Gay-Lussac-Joseph-Louis.html（2011 年 1 月 9 日有效）。

[6] 同上。

[7] 那些学习过偏微分方程式的人，看到这种将两个定律合并起来的方法可能会觉得眼熟。其实我是从“变量分离法”中受到启发，这是一种解偏微分方程式的笨方法。

[8] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Equipartition_theorem（2011 年 1 月 9 日有效）。这就是维基百科如此重要的原因之一。当他们要求捐款时，我总是会贡献一点。维基百科上对于基础思想总有一些相对简单的解释，同时也有足够多的高端材料，能够满足最苛刻的理论物理学家的需求。另外，上面也有很多精彩的照片和图片。点开链接后看到的是“条目”，但也不妨看一下“讨论”部分，在上面你会看到一个“条目”是如何演化成形的。



第 4 章

绝对零度

我小时候，礼拜日的下午经常用于如今人们所说的智能培养。我们家在郊区，但父母擅于利用纽约丰富的博物馆资源。每到礼拜日，我们就会乘上火车，前往纽约、纽黑文和哈特福德，在施拉夫特餐馆吃完午餐后，便一头扎向博物馆。去大都会美术馆的时候，我总是觉得苦不堪言（除了看到骑士盔甲的时候，因为我没想到 15 世纪的骑士竟然那么矮小），但还是要忍受，因为我知道下一次父母就会带我去美国自然历史博物馆，如果运气非常好的话，也许会带我去海顿天文馆。即使现在的互联网丰富多彩，也很难想象在网上冲浪能够像亲临一个天文馆一样为孩子带来同等奇妙的感觉。

我在海顿天文馆的每分每秒都乐在其中。参观的结尾是观看蔡司天象仪的投影表演，其精彩程度完胜我看过的所有电影场景。另外一大乐趣便是穿行在天文馆的太阳系分馆内。参观者可以称量自己在火星上的体重，也能够了解到冥王星（对我来说，冥王星永远都是一颗行星）上的气温。对我来说，最大的困惑就是，他们怎么知道的？

我当时知道人类并没有登上冥王星，连火星也没有登上。那么对于一块未曾涉足的土地，怎么能够测量它的温度呢？就算人类能够登上火星或冥王星，那么登上太阳表面总不可能吧，他们又怎么知道太阳表面的温度为 5500 摄氏度呢？而蓝巨星的表面温度更高，可以达到 50 000 摄氏度。不过，相比于日冕的 1 000 000 摄氏度以及太阳核心的 25 000 000摄氏度，以上就是小巫见大巫了。可他们是怎么知道的呢？一根能够测量 25 000 000 摄氏度高温的温度计是什么样的呢？

还有一个问题我更加琢磨不透：25 000 000 摄氏度的高温高出纽约郊区的温度十万八千里，而冥王星（一朝为行星，终生为行星）表面温度大约为零下 200 摄氏度，则似乎与地球相差得并不太离谱。为什么温

度高起来没个头，而低起来则似乎比零下 200 摄氏度低不了多少呢？

冷的本质

是否存在一个低温的极限，这一问题最早在 17 世纪就提了出来。当时人们对于冷和热各有一套相类似的理论。热的方面就是燃素说，它将可燃性看做含有一种叫做燃素的物质；当一种物质燃烧的时候，空气会吸收燃素，燃烧后的灰烬便成为“去燃素”的物质。类似地，冷也是从一种物质转移到另一种物质。冰冻理论认为世界上存在一种终极冰冻体[1]，它即是寒冷的终极提供者，其他所有物体均从终极冰冻体上获取寒冷。

英国物理学家罗伯特·玻义耳是历史上第一批利用科学实验手段探索冷的本质的科学家之一。当时正值小冰期，欧洲陷入了持续数百年的寒冷气候当中，而在玻义耳开展此项研究时，寒冷气候正达到其最低气温的时候。这恐怕不只是巧合而已。玻义耳称量了一桶水的重量，然后把水放在室外，等第二天水结冰了之后再次称量。冰所占据的体积比原来水的体积要大（冰比水密度低，因而冰块会漂在一杯水上），甚至撑破了桶壁，不过其重量却跟之前一模一样。如果水确实从终极冰冻体中吸收了什么东西的话，那么显然所吸收的物质是没有重量的（即使有重量，也是 17 世纪的测量工具无法测量出的微小重量）。玻义耳所得出的结论是，物质之所以变热或变冷是由于物质内部的一些特性所引起的。不过，热力学的进一步发展则要等到测温学的发展以及标准刻度的采用之后了。

测温学的发展以及纪尧姆·阿蒙顿的实验

最早发明蒸汽机［当然，这是项当时无法商业化的发明（图 6），否则工业革命就要提前两千年发生了］的亚历山大港的希罗已经认识到空气受热后会膨胀，从而制造了原始的温度计。他将试管开口的一端插入一个水容器中。随着空气的膨胀或收缩，水与空气的交界面会上下移动。这个设备的问题是它会受到气压变化的影响。解决这一问题的办法直到 17 世纪中期才出现，当时的托斯卡纳大公斐迪南二世·德·美第奇使用一管密封的酒精来代替空气，从而隔离了气压的影响，这样酒精



图 6　汽转球是已知最早以蒸汽发动的机器，由亚历山大港的希罗首先提出（来源：*Knight's American Mechanical Dictionary*，p. 17，1876）

的体积只受周边气温的影响。在密封管旁边标上刻度以后，温度计就可以实际使用了。随着科学家用水银取代酒精作为指示剂，现代温度计的研发也就差不多完成了。选用水银后，温度计也可以造得更加小巧。正是借助空气-水银温度计的帮助，纪尧姆 · 阿蒙顿首次提出了测量最低温度数值的可能性。

阿蒙顿是一位法国科学家，自小耳朵就听不见，这可能也是他没能进入大学学习的原因。他自学了数学和科学，改进了温度计、气压计以及湿度计的设计，后来又将研究注意力从摩擦力转向气体中温度与压力之间的关系。他将一个装着空气和水银的容器放入水中。根据阿蒙顿的测量记录，水结冰时对应的刻度为 51，而水沸腾时对应的刻度是 73。阿蒙顿提出，当空气的体积及相应压力为零时，便无法再进行进一步的冷却，不过他并没有去计算绝对零度的数值。

我们这里可以去算一下。阿蒙顿的温度计上面的一个刻度等于 4. 55 摄氏度。依照他的数据，从冰点减去 51 个刻度，即减去 232. 05 摄氏度，便可使空气的压力变为 0。这个结果已经很不错了（实际数值大约为 −273. 15 摄氏度），要知道在 18 世纪晚期，安托万 · 拉瓦锡、皮埃尔-西蒙 · 拉普拉斯以及约翰 · 道尔顿测算出的绝对零度还徘徊在 −1500摄氏度到 −3000 摄氏度之间。最终的数值以及绝对零度这个名称，都是由开尔文男爵确定的。他提出了一个始自绝对零度的温标，而水的冰点对应 273. 15 开尔文。

尽管理论上已经标明了，但并没有人准备去制造绝对零度，这在当时看来就像月亮或恒星一样遥不可及。个中原因无非就是人类还无法制造寒冷。制造热是很容易的，只要找来可燃物，点燃它即可。但在当时只有自然界才能制造寒冷，这一点直到 19 世纪初一位科学家做的一次实验才被

打破，而这位科学家所做的其他所有事情恐怕都比这件事要有名。

迈克尔·法拉第和气体液化

迈克尔·法拉第年轻的时候曾听过知名化学家汉弗里·戴维爵士的几堂公开讲座，当时他还在一家装订厂工作。法拉第大胆写信给戴维，自告奋勇，询问他是否需要助理。戴维被他打动了，就聘了他做助理。于是，科学史上最伟大的一位实验科学家的事业就此展开了。

当然，法拉第最为人所知的是他有关电的实验，不过在化学领域，他同样贡献卓著。有一天他通过水合氯醛制出了液态氯。当时他把液态氯装在一个密封的试管里，当他想要更近地观察时，不小心打破了试管。试管在实验室里炸开，玻璃碎片四处翻飞，液态氯瞬间从液态转化为了气态。作为一名聪敏的观察家，法拉第想到既然液体的蒸发会导致爆炸，那么如果施加压力在气体上可能会产生相反的效果，使气体液化。有趣的是，尽管法拉第偏爱纯科学研究，而对于将科学发现商业化没有太大兴趣，但他还是在本子上记下了：这一现象在未来应该会有商业上的应用。[3] 当然，这一点在日后也成为了现实，厨房里的冰箱就是最好的例子。液体在冰箱的制冷系统里循环。先是在冰箱内的蒸发器汽化，吸收周围的热量，从而达到制冷的效果。而后汽化的气体被压缩机加压，重新液化，并释放出从冰箱内吸收的热量。液体会如此循环往复，直到冰箱内达到某一均衡温度。虽然道理十分简单，但该发现彻底改变了世界。

化学家通过一个相态图来表现不同物质的液化点和固化点。一条轴代表压力 P，另一条轴代表温度 T，$P-T$ 平面分为几个区域，每个区域代表物质的不同状态（图 7）。[4] 很多气体的相态图显示，比如二氧化碳

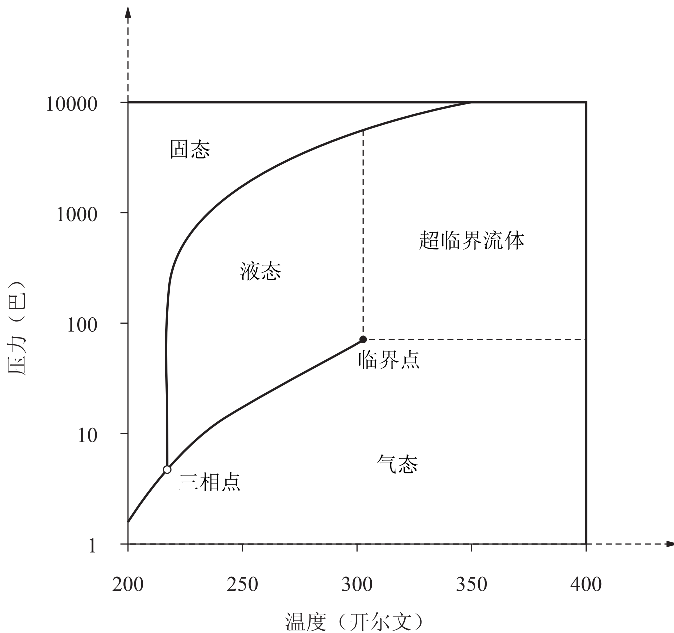


图 7　二氧化碳的相态图。在热力学里，三相点是指可使物质的气相、液相、固相共存的一个温度和压力；而临界点是指可使物质以液态存在的最高温度或以气态存在的最高压力，当物质的温度、压力超过此界线时，它会相变成同时拥有液态及气态特征的流体：超临界流体（制作者：Ben Finney，Mark Jacobs）

以及冰箱内的那些气体，只要有足够的压力，即使在室温下，也可以产生液化效果。但有些被称为永久气体的物质，仅靠改变压力是难以制造出液化效果的。荷兰物理学家范德华对此作出了解释，他认识到分子内的作用力使得仅仅依靠压力来液化永久气体会异常困难；要做到这一点，必须要进行相当程度的降温操作。

要获得这些更低的温度需要使用被称为阶式液化的技术，也正是依靠这种技术，人类在寻找最低温度的道路上取得了很大的突破。阶式液化是通过先液化一种气体，然后运用该气体去为另一种气体降温，之后再通过增加压力的方式液化第二种气体。第一种通过这种技术进行液化的永久气体是氧气，然后是氮气。最终，了不起的苏格兰物理学家詹姆斯·杜瓦成功攻克了被他喻为“氢气高峰”的难题，在 -252.87 摄氏度的温度下将氢气液化[5]。

尽管杜瓦花了超过十年的时间才取得这项成就，但他并没有在科学界获得他自认应得的荣誉。杜瓦的运气很差，在他登顶“氢气高峰”时，威廉·拉姆齐爵士正好完成了某项更加惊人的工作：他分离出了氦气，这种气体一度被认为只存在于太阳。设想一下如果艾德蒙·希拉里爵士刚登顶珠穆朗玛峰，结果发现远方还有一座更高的山峰在向他招手，然后又被告知那山峰已经有人爬上过了，这恐怕就是杜瓦当时的心情吧。

在液化氦气的竞赛中打败杜瓦的是荷兰物理学家海克·卡末林·昂内斯，而他在获得液态氦气时所达到的温度仅仅高于绝对零度四摄氏度。昂内斯以及英国物理学家欧内斯特·卢瑟福男爵两人，尽管在不同的国家工作，解决的问题也不同，却同时发展出了如今被称为“大科学”的科研方式。过去的科学家通常要不就是独行侠，要不就是在一个小团队中工作，而昂内斯和卢瑟福则都发展出了大型的实验室，一大帮科学家和技术人员在其中工作。正如作家达蒙·鲁尼恩所说：“快跑的未必能赢，力战的未必得胜，但这就是下注的方式。”[6]卡末林·昂内斯采用了一种阶式液化技术的变种，运用氧气去液化氮气，然后运用氮气去液化氢气，最后用氢气去液化氦气。这和杜瓦使用的方法一样，只是昂内斯的资源更加丰富。结果在 1908 年，昂内斯取得了成功。

这项成就还附带令人意外和兴奋的发现。在分析液氦的属性时，卡末林・昂内斯决定要测量一下它的电阻，结果发现，在一个足够低的温度下，液氦完全没有电阻；液氦中的电流长流不止。人类所知的第一个超导体就这样被发现了。（寻找高温下的超导体是当代物理学的主要课题之一，那些在常温下能实现超导并易于造型的材料无疑具有极大的经济价值。）另外一个同样令人吃惊的发现是液氦没有黏性。有黏性的物体，比如蜂蜜和糖浆，会很难倾倒。而将液氦放在一个敞口的容器内，它会显得不受重力约束，随意流动，甚至会漫出容器。[7]

科技进步的标志之一就是某种原本少见的物质变得唾手可得。一个世纪前的艰巨任务如今已经成为商业中的基本材料。现在一公升液氦的价格已经和星巴克的一杯拿铁加饼干价格相当。不过它的保存却不容易，恐怕需要一个特殊的杜瓦真空瓶，而这个设备要花费数千美元。杜瓦和卡末林・昂内斯都因他们对于终极寒冷的追寻而被人们铭记，这似乎也比较合乎情理，虽然两位被铭记的方式不尽相同。

玻色-爱因斯坦凝聚与终极寒冷领域

我出生后大约十年，室内空调才开始普及。而纽约郊区的夏夜常常是非常炎热的，为了能够入睡，我们会采取一种非常简单的降温方式：在睡前往身上轻轻洒一层水，水分会慢慢蒸发，起到为身体降温的效果。这就和一杯没盖盖子的热水会慢慢凉下来的道理一样：分子有一定的平均温度，但温度最高的分子会蒸发离开，留下温度较低的分子。

通过对于液氦蒸发冷却技术的巧妙运用，20 世纪中期的科学家得以达到仅高于绝对零度千分之一度的温度。然而科学家却希望更进一步，他们在追寻一种新的物质状态，爱因斯坦曾预言过这种状态的存

在，但其存在只有在无限接近绝对零度时才能被发现。

这一研究的推动力是来自一个当时意想不到的地方——印度。一百年前，印度还被认为是一块科学上的不毛之地。然而“一战”前不久，一位名不见经传的印度数学家拉马努金给牛津大学的数学家戈弗雷·哈罗德·哈代写了一封信，描述了一些有趣的发现。哈代形容这封信是他一生中真正感觉罗曼蒂克的瞬间。拉马努金的一些结论他已经知道，一些他持有疑义，但还有一些结论却令他大为吃惊。他曾经写道：“这些结论一定是正确的，因为倘如它们不正确，没有谁会有如此想象力能创造出来。”[9]这封信也使拉马努金成为了一名国际数学界的明星。十年之后，印度物理学家萨特延德拉·玻色写了一封信给爱因斯坦，是关于光子的统计力学研究。或许是记得哈代收到拉马努金信时的情形，爱因斯坦读了玻色的信后被深深打动，并将玻色的结论翻译成德文，又以玻色的名义将文章投到著名的《物理学杂志》上。[10]爱因斯坦将玻色的工作扩展到其他一些粒子，并预言存在一种尚未被证实的物质状态。这一物质状态被称为玻色–爱因斯坦凝聚，只有在非常接近绝对零度时才存在。玻色–爱因斯坦凝聚是玻色子（自旋为整数的各种粒子，可以是基本粒子，比如传播相互作用的粒子；也可以是复合粒子，比如碳 12 的原子核）只占据能量最低的量子态时的状态。在这一状态下，这些粒子均丧失其本来的属性，不仅是“人人为我、我为人人”，而是变成“人人是我、我是人人”。

玻色和爱因斯坦已经证明，玻色–爱因斯坦凝聚所需的温度远低于运用液氦蒸发冷却技术所能达到的温度。

为实现这一目标，需要引进一种新的技术——激光。当原子冷却后，其动能会下降。而由于动能取决于原子的质量和速度，所以速度也

必须下降。绝对零度就是原子完全停止不动时的温度，不过量子力学已经证明这是不可能达到的，只能逼近。尽管如此，使用激光冷却技术能使得原子的运行速度小到完全分辨不出静止还是运动。道理非常简单明了：如果一个原子沿着某一个方向运行并撞击到反方向运行的一个光子，原子便会从光子上吸收一些能量。就像在球场上撞上防守队员，运动员的脚步自然会慢下来，因此撞击到光子的原子运行速度也会减慢，只要该光子的频率与原子自发辐射（不受外界作用时，自发地辐射出一个光子）时的频率“产生共振”或相一致即可。

科学家们争相比赛谁能第一个制造出玻色-爱因斯坦凝聚，其激烈程度丝毫不亚于一个世纪前制造液氦的竞争。不过这次的竞争气氛更为友好，各个竞争团队会一起参加会议，交流心得、结论和想法。其中一个团队由来自科罗拉多大学波尔得分校的埃里克·康奈尔和卡尔·威曼率领，另一个则由麻省理工学院的沃尔夫冈·克特勒主持。埃里克·康奈尔和卡尔·威曼拔得头筹，将大约两千个铷原子冷却到绝对零度以上不到百万分之一度的温度时观察到了玻色-爱因斯坦凝聚。不久克特勒也获得了类似的成果，但使用了远多于前者的原子数量。最后，三位都获得了 2001 年的诺贝尔物理学奖。[11]

还记得在我参观海顿天文馆的时候，讲解员讲到虽然太阳日冕的温度高达上百万度，但我们却感觉不到其热度。我很吃惊，即使是热水倒到身上，我们都会感觉得到。然而，由于太阳的日冕稀薄得不可思议，因此所含的热量也少到几乎不存在。类似地，你也绝不可能捡起一块干冰（－78.5 摄氏度的二氧化碳固体）。通过一个简单的运算也可以说明，我们完全可以捡起一个玻色-爱因斯坦凝聚，而不受任何伤害。最初的玻色-爱因斯坦凝聚仅仅包含 2000 个铷原子。相比之下，一粒盐就包含大约 10^{18} 个原子，即立方体的每个表面含有 1 百万个原子。而一个

含有 2000 个原子的立方体的每个表面大约只有 13 个原子。虽说铷原子要比钠原子或氯原子（盐的成分）大一些，但如果 2000 个铷原子组成的玻色-爱因斯坦凝聚构成一个立方体的话，其边长大概也要小于一颗盐粒棱边长度的万分之一。因此，即使是接近绝对零度，用手将其捡起也是安全的，当然前提是你要能找得到它。

最后的新花样：负的绝对温度

世界上通用的两种温度测量方式华氏度和摄氏度均有负的温度，因为它们的零度不过是一个参考点而已。如果气温掉到零摄氏度以下，说明今天有点冷，但不是特别冷；而如果温度掉到零华氏度（－17.78 摄氏度）以下，说明今天非常寒冷，不过这对任何居住在美国中西部或加拿大的民众来说应该已经习以为常。然而，绝对零度意味着一切运动全部停止，但这一点又是违反量子力学的。因此如果绝对零度对应的是没有运动，那么我们可以想象当温度低于绝对零度时，对应的则应该是不属于这个宇宙的量子。或许是快子？这是一种假想粒子，拥有质量却能以超光速的速度运行，它或许能达到负的绝对温度。但到底什么东西能比没有运动运动得更慢呢？

这里的问题是，我们一直在以运动的概念来定义温度，这种方式来自于经典物理学。统计力学对于温度的定义则更加宽泛，采取这种方法就可以定义负的绝对温度。对此的准确解释需要用到微积分以及熵的知识，但我们可以大致了解负的绝对温度是怎样产生的，而无需涉及太多这两方面的知识。不过对于熵，我们会在第 7 章讨论热力学的时候进行更细致的探讨。

下面是一个大家熟悉的例子，可以用来说明熵的概念。最近我参加

了一个正式晚宴，晚宴分为两个阶段，餐前鸡尾酒阶段和晚餐阶段。在鸡尾酒阶段，人们自由走动；等到用餐开始，人们纷纷坐回安排好的位置上。对于熵的一个非正式定义是，熵是在不同系统状态下个体元素所具备的不同排列方式的数量。晚宴上只有两种系统状态：鸡尾酒阶段和晚餐阶段。而在这里，系统中的个体元素就是客人。鸡尾酒阶段的熵比晚餐阶段的熵高，因为在鸡尾酒阶段客人的排列方式要比晚餐阶段的更多。统计力学中使用“宏观状态”一词表示对系统内较高层的描述，使用“微观状态”一词来表示对较低层的描述。对应着鸡尾酒阶段宏观状态的微观状态大概应该如此描述：“弗雷德在吧台喝着马蒂尼酒，正和阿妮达聊天，阿妮达刚刚从酒保那里点了一杯血色玛丽。”

接下来我们来想象一杯漂浮着一块冰的水。两个相邻的冰分子被限制在彼此靠近的位置，并按照大致相同的方向运动。但当冰块融化以后，这两个分子就可以在杯中自由移动，失去彼此的关联性。冰水混合的状态所具有的个体分子的排列可能要比冰化为水时的排列少，因为后者中不存在“相邻分子”的限制。

熵也有可能会减少，不过在日常生活中，要使熵减少必须往系统中注入能量。在晚宴上，如果放任自由的话，客人会喝着鸡尾酒，四处走动。这时女主人必须宣布晚餐开始或率先落座示意大家。我们也能让一杯水转变为冰水混合的状态，但必须引入一定的能量来制造冰。这一事实使我们能够为绝对温度给出在数学上更精准的定义，这时绝对温度不再是粒子动能的函数，而是注入系统中能量的变化与相应熵的变化的比值（如果读者熟悉微积分的话，这里的公式为 $T = \mathrm{d}S/\mathrm{d}E$）。

当然，对于多数我们熟悉的系统来说，注入能量后熵会增加。在一个接近绝对零度的系统中，所有分子均以极低的速度运行，微观状态数

量很少，因此熵会很低。为系统注入热量后，分子的运行速度会加快，并不再被限制在彼此非常靠近的状态，于是熵便会增加。由于能量被注入该系统导致熵的总量增加，dS/dE 的符号为正，因此我们观测到的温度总是正的。从理论上讲，这些系统具有无限数量的微观状态；注入足够的热量以后，我们可以想象分子会以非常高的速度在整个系统内四下翻飞。不过，有些系统只能实现有限数量的微观状态，在这些系统中所发生的情况与我们日常生活中的有所不同。在此类系统中存在一个临界点，过了这个临界点以后，再注入更多能量，系统的熵反而会下降；这就对应了一个负的绝对温度，因为这时能量注入导致熵的减少，相应 dS/dE 的符号为负。

运用量子理论，我们可以想象出这样一个系统，并不难看出负的绝对温度（随着能量增加而熵减少）是如何产生的。假设通过磁阱使四个原子被限制在一根非常细的金属丝上，于是当能量被注入时，所有能量都被用于改变原子的自旋而非其位置或速度。假定该系统并非玻色-爱因斯坦凝聚，所以原子 1、2、3、4 均拥有自己的属性。每个原子拥有两种状态：自旋向下（低能量）状态或自旋向上（高能量）状态。假设该系统的初始状态是最低能量配置，即四个原子均处于自旋向下状态，这也是该能量配置下系统的唯一微观状态。如果此时加入一个量子的能量，会产生四种可能的微观状态：其中任意一个原子都有可能变成自旋向上状态，而另外三个则保持自旋向下状态。这时微观状态的数量增加了，即能量的注入导致了熵的增加，这对应的便是正的绝对温度。如果再注入一个量子的能量，则会产生六种可能的微观状态：四个原子中的两个（1 和 2，1 和 3，1 和 4，2 和 3，2 和 4，3 和 4）会变成自旋向上状态。同样，这次能量的增加也导致了熵的增加。然而，如果此时再注入一个量子的能量，将只剩四种可能的

微观状态：四个原子中只有一个处于自旋向下状态，而另外三个均处于自旋向上状态。这时能量的增加便导致了熵的减少，于是绝对温度为负——“低于”绝对零度。

奇异得超乎我们所能想象?

这样的系统不只有负的绝对温度一项怪异之处。尽管可能看上去十分怪异，但这样的系统处于负的绝对温度时要比处于正的绝对零度时更热，并且热量会从负的绝对温度系统传导至正的绝对温度系统！当然热量总是从热的系统向冷的系统传导，不过这里并非是以温度衡量的。实际上，在绝对温度的量表上，从略微高于绝对零度到正的绝对温度再到正的无限大（尽管这不可能达到），然后跳至负的无限大（同样也不可能达到）再到负的绝对温度，最后到略微低于绝对零度，这是个愈来愈热的过程。因此，可以说略低于绝对零度时是比地狱还要热很多。

了不起的天体物理学家阿瑟・爱丁顿爵士曾经说过，宇宙不仅是奇异得超乎我们想象，而且是奇异得超乎我们所能想象。[12] 如果我们能用数学来描述，那它或许就并未超出我们的想象。有人可能会争辩说，负的绝对温度只是一种从温度的数学定义推导出的人造物。但温度的这种定义是为了使处于热平衡的任意两个系统具有相同数值的温度。

负的绝对温度似乎不见于我们的宇宙，但我们可以通过定义温度的热力学等式，再加上统计力学的知识，来预言一种或许超出宇宙本身想象力的现象。在实验室中我们已经创建出了负的绝对温度的系统，相关的研究也已经进行了近半个世纪。虽然对此的商业化产品尚未出现，但请耐心等待吧。想想一个世纪以前，几滴液氦就花费了科学家将近二十

年的努力，而现如今已经可以随便在谷歌上搜到五美元一公升的卖家了。[13]

注释

[1] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Absolute_zero（2011 年 1 月 17 日有效）。

[2] 同上。

[3] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday（2011 年 1 月 17 日有效）。

[4] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_diagram（2011 年 1 月 17 日有效）。

[5] 可参见 http://www.pbs.org/wgbh/nova/transcripts/3501_zero.html（2011 年 1 月 17 日有效）。这是广受好评的 PBS 剧集《新星》中一期节目的剧本。整个节目时长 105 分钟；内容精彩至极，通过以下链接可以直接观看：http://www.cosmolearning.com/documentaries/absolute-zero-2008/1/（2011 年 1 月 17 日有效）。

[6] 可参见 http://thinkexist.com/quotes/damon_runyon/（2011 年 1 月 17 日有效）。

[7] 可以在以下链接直接观看：http://www.cosmolearning.com/documentaries/absolute-zero-2008/1/（2011 年 1 月 17 日有效）。

[8] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Bose-Einstein_condensate（2011 年 1 月 17 日时有效）。

[9] T. Koshy, *Elementary Number Theory with Applications*, 2nd Ed. (Burlington, MA: Academic Press, 2007), 567。

[10] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Bose-Einstein_condensate（2011 年 1 月 17 日有效）。

[11] 同上。

[12] 尽管这句名言的出处存在争议，不过我在讲普朗克常数的章节里还会再次提到它，因为我觉得它说得太好了。可参见 http://en.wikiquote.org/wiki/Arthur_Stanley_Eddington（2011 年 1 月 17 日有效）。

[13] 这的确很惊人，却也千真万确。可参见 http://hypertextbook.com/facts/2007/NadyaDillon.shtml（2011 年 1 月 17 日有效）。不妨拿几样东西的价格作为参照。由于 1 加仑合 3.785 公升，所以液氦的价格大约为 19 美金每加仑。你爱喝的酒可能都要比这贵，当然这是假设你对酒有选择，而不是随便在连锁店买两美元一桶的便宜货。



第 5 章

阿伏伽德罗常数

物理学可能称得上是最基础性的一门科学，但对我们生活（以及更重要的，对我们的生活质量）影响最大的则是化学。这是一本关于基础科学的书，但请允许我在此岔开一下，说一说经济学。鉴于我们花费在经济活动（“商品和服务”的生产、流通及消费）上的大量时间，你可能会觉得经济学才是生活中最重要的一门科学，毕竟经济学研究的是就业、税收等占据我们生活大量时间的事情。然而，没有商品和服务就没有经济学可言，那么商品和服务来自哪里呢？而且服务在两者当中明显居于次席，没有商品也就没有了各种服务存在的基础，毕竟没有人会说：“他是在运送服务。”那么，一旦涉及商品，便没有什么比化学更重要的了。我看到过一个估算，说单在伦敦就可以买到多达 100 亿种不同的商品[1]，其中大量新商品都是我们利用化学知识创造出来的。而这些化学知识的根基便是本章要讲述的主题——阿伏伽德罗常数，它告诉我们一定量的物质中所含微粒的数量。如果没有阿伏伽德罗常数，我们的化学可能还停留在撞大运的阶段，炼金士往烧杯里添加各种材料，然后期待产生有趣的结果。这样的话，现代生活中大量美好的事物就可能不会出现。

为更好的生活创造更好的东西

我出生于 1939 年，纽约世界博览会在当年的春夏两季举办。此后不久，德国入侵波兰，第二次世界大战便爆发了。回顾这届盛会为“明日世界”展望出的美好前景，我们现在不免感慨。当然，这并不是说博览会上的所有设想都被证明不过是场白日梦而已。在其中的生产与流通展区中有一家主要参展商是世界最重要的化学企业之一杜邦公司。它们展示了两种新的合成材料——氯丁橡胶和尼龙，这两项前沿成果拉开了

塑料席卷整个世界的序幕。这些成果的主持人是华莱士·卡罗瑟斯[2]，他原本是在哈佛大学工作，后来受到行业中大量科研设备的吸引转而投奔杜邦公司。

卡罗瑟斯（及杜邦公司）带给世界的影响极为深远。比如，我工作的桌子就是用某种塑料制成的，打字的键盘也基本是塑料的，而输入的文字也显示在一面主要由塑料制造的屏幕上面。我列了一份书桌上的物品清单，其中至少有 20 种不同物品的主要成分为塑料。而我脚下的鞋是塑料制的，头上戴的镜框也是塑料的。可以说，我所居住的整个房间基本上就是一个有机合成化学的展区。可惜的是，卡罗瑟斯生不逢时，并未享受到合成化学日后的光辉成果。他由于精神抑郁而自杀身亡，没有等到 20 年后抗抑郁药的普及。

为建设明日世界（昨天的明日世界即眼前的今日世界）踏出关键性第一步的便是之前已经介绍过的约翰·道尔顿。在理想气体常数一章，我们讲过道尔顿的一次失误，他认为气体的膨胀率与膨胀前的体积成正比。许多伟大的科学家在研究事业中都犯过严重的错误（比如莱纳斯·鲍林曾提出 DNA 的结构为三重螺旋的，差了不是一点半点），但他们的成就才是代表他们事业的符号，而道尔顿的原子论便是科学史上最重要的里程碑之一。没有原子论，化学还将基本上处于撞大运的阶段。没有原子论，也不会有如今我们享有的这么丰富的商品。

道尔顿原子论的基本原则中，首要的一点是，一切物质均由极微小的粒子——原子构成。这样化学才成为一门研究物质的原子如何结合和分离而构成不同物质的学问。其次，根据道尔顿的理论，不同元素的原子属性各不相同，不同化合物的分子属性也各不相同（道尔顿将它们称为“终极粒子”），而相同种类的原子或分子属性是一样的。最后，当

元素构成化合物时，元素的原子按简单整数比构成化合物的分子。尽管这些基本原则被现代科学发现存在例外情况，但它们受到推崇更多是因为它们发现了规则而非例外。正如理查德·费曼 1961 年在加州理工学院的入门讲座中所说的："假如在某次剧变之后，一切科学知识都荡然无存，仅剩一句话可以传给后世，那么哪个论述是用最少的字词囊括最多的信息呢？我认为是原子假说……一切事物均由永远运动着的微小粒子——原子所构成。"[3]

然而，从道尔顿、原子论到尼龙、百忧解，再到将 1939 年世博会的明日世界变成今日世界，人类走过了一条漫长而曲折的道路。原子论是人类迈出的关键性第一步，但仅靠对于砖块的了解还不足以让建筑拔地而起。在杜邦公司实现他们的口号（"通过化学为更好的生活创造更好的东西"）之前，还有大量的工作有待完成。

化合物的结构

把砖块垒起来后，房子随之而起。同样，将原子放在一起，就会构成化合物。正如建造一栋房子，我们需要知道砖块数量、摆放位置等，要创造出化合物，我们也得知道需要什么样的原子以及如何摆放这些原子。诚然在 19 世纪前半叶，科学家尚未认识到原子的排列方式在分子中所发挥的作用，仅仅确定化合物中原子的数量已经是一项艰巨的任务了。

在道尔顿的原始理论中，相同元素可以构成不同的化合物。例如，道尔顿知道两种完全不同的氧化碳，即今天所知的一氧化碳和二氧化碳，并经过研究后确定一氧化碳中包含一个氧原子和一个碳原子，而二氧化碳中则有两个氧原子和一个碳原子。据此，他推算出了有点精准的

碳原子和氢原子的相对原子质量。计算结果的精准度由于道尔顿对世界上最重要也最普遍的物质——水的化学构成认识不足而大受影响。

道尔顿发展出了一套系统方法来描述化合物。在道尔顿的体系中，二元化合物是由一种元素的一个原子与另一种元素的一个原子组成；三元化合物就是由一种元素的一个原子搭配另一种元素的两个原子组建而成；四元化合物则是由一种元素的一个原子搭配另一种元素的三个元素组建而成。这一体系对于二元化合物一氧化碳和三元化合物二氧化碳的描述是成功的。然而，由于在道尔顿的时代人们只知道一种氢氧化合物——水，因此道尔顿错误地假定水分子是由一个氧原子和一个氢原子组成。道尔顿知道，等体积的氢气和氧气化合而成的水的重量是原先氢气重量的九倍，又由于他以为水中含有等量的氢原子和氧原子，因此通过简单的数学运算，道尔顿得出了氧原子的重量约为氢原子八倍的结论。

阿莫迪欧·阿伏伽德罗与斯坦尼斯劳·康尼查罗

相对原子质量的问题最终是由两位意大利科学家解决的。不过，尽管阿伏伽德罗对于现代化学的发展作出了举足轻重的贡献，但他并未被普遍认为是一名化学家。的确，阿伏伽德罗职业生涯的大部分时间都是作为一位数学和物理学教授，但他的名望主要源自他在 1811 年发表的一篇论文，这篇论文的标题相当长——“论构成物质的基本分子（即原子）的相对质量及构成比例的确定”。在 19 世纪，发表论文要比现在困难得多，既没有可以发布博客的网络，也没有搜索引擎供人查找，于是这篇有着冗长标题的论文轻易就石沉大海了。这真的很遗憾，阿伏伽德罗发展出了能够加速化学发展的理论，化学家本可以借此测算出元素准

确的相对原子质量，然而却这么错过了。

一切要从阿伏伽德罗假说说起。假说描述起来非常简单：在同温、同压下，相同体积的气体中包含的分子数量相同——注意，不是原子数量。原子和分子的区别对于道尔顿及其同时代的其他科学家来说还不十分明确。道尔顿认识到分子是构成化合物的不可拆分的基本单元，但他并未认识到对于有些元素，比如氢、氮和氧，同种元素的原子能够彼此结合，从而构成氢气、氮气和氧气的双原子分子。（更一般地，道尔顿认为原子是不可再分的微粒，这一点直到 1938 年奥托・哈恩和弗里兹・斯特拉斯曼通过铀的裂变得到钡时才被打破。）我们在前文已经讲过，由于道尔顿对于水分子的构成判断错误而导致对于氧原子相对质量的测算失误，而该错误将由阿伏伽德罗假说及其提出的方法论所纠正。

其中的关键实验涉及将两升（或任何固定体积）氢气与一升氧气混合；只要两者处于相同的压力和温度下，它们反应之后便会得到处于同样压力和温度下的两升水蒸气。根据阿伏伽德罗假说，相同体积的气体中包含的分子数量相同；因此，这两升水蒸气中所含的分子数量与原先氢气的分子数量相同，并且是原先氧气分子数量的两倍。于是一个水分子所含的氢原子数量应该是氧原子数量的两倍，也就意味着水分子最简单的结构即是如今人们所熟悉的 H_2O。据此，准确的氧原子相对质量便可以计算出来了，其相对质量并非像道尔顿得出的那样是氢原子质量的八倍，而是接近十六倍。事实上，阿伏伽德罗亲自算过这一数据，并得出了十五倍的结论。

通过阿伏伽德罗假说，还可以推导出另一个更微妙的结论。如果像道尔顿认为的那样，氢气和氧气都是单原子分子而非双原子分子，那么化学反应之后所产生的水分子数量将和原先的氧原子数量相同，也就是

说，理论上应当得到一升水蒸气，而非实验得到的两升。要解决这一分歧，我们只有假定每一个氢分子含有两个氢原子，而每一个氧分子含有两个氧原子。这样两个氢分子就包含四个氢原子，一个氧分子就包含两个氧原子，化学反应后才会产生两个水分子。一个水分子包含两个氢原子和一个氧原子，两个水分子包含四个氢原子和两个氧原子，如此这般，原子的账目才对得上。

阿伏伽德罗深知他的假说会产生巨大的影响，正如他在那篇开创性论文中所说的："从这一假说出发，显然我们掌握了简单的测算方法，能够确定气体状态下物质分子的相对质量以及在化合物中这些分子的相对数量，因为不同气体分子的质量比等于同温同压下不同气体的密度比，而一旦知道构成某种化合物的气体的体积比就马上可以得出该化合物所含不同分子的相对数量。"[4]

科学史上不乏科学发现的重要性在发表时未被人们意识到的例子，阿伏伽德罗的贡献更是被埋没了近半个世纪。在德国化学家和史学家赫曼恩·科普于 1843 至 1847 年间出版的经典四卷本《化学史》中，只字未提阿伏伽德罗的贡献。甚至 1856 年阿伏伽德罗离世时，《新实验》（*Nuovo Cimento*）杂志上的讣告也没有提及他的化学理论！最终，通过另外一位意大利人斯坦尼斯劳·康尼查罗的努力，人们才注意到阿伏伽德罗假说能够解决众多问题。

或许是因为阿伏伽德罗假说太超前于时代，当时的化学家还不习惯以原子和分子的方法分析化学，因而没有机会见识其威力。又或许只是因为他未被同仁视为一名化学家，因而其化学研究受到忽视。不论如何，康尼查罗是一位具有一定地位的化学家。他曾发现一种不寻常的反应类型，如今被称为康尼查罗反应[5]，因此同仁可能对他更为重视。

（该反应超出了本书的范畴，熟悉化学的读者可能知道，它指的是醛在强碱作用下发生分子间氧化还原反应，生成一分子羧酸和一分子醇的有机歧化反应。）但不管怎样，如果不借助简洁而强大的阿伏伽德罗假说，化学是否能够发展到足以分析如此复杂的反应，对此我是心存怀疑的。

在阿伏伽德罗讣告发布两年后，康尼查罗在同一本杂志上刊发了一篇论文，重申了这一假说，并探讨如何运用它来解决当时化学家所面临的许多复杂问题。这一次，化学界终于意识到它的重要性。正如伟大的德国化学家尤利乌斯·洛塔尔·迈耶尔后来所写的："阿伏伽德罗假说的影响非常巨大，特别是对于化学理论的发展……阿伏伽德罗定律标志了一般化学理论的开端，这一理论能够解释化合物的原子构成及其主要属性。"[6]

德米特里·门捷列夫与元素周期表

等到康尼查罗捧红阿伏伽德罗时，化学家已经发现了 63 种不同元素。尽管他们掌握了确定化合物原子构成的手段，但仍然缺乏一套规则，可以用来描述各种原子及其所能构成的各种化合物。比如，质量很轻的爆炸性金属钠与有毒的黄绿色气体氯气发生化学反应，将会生成普通的食盐——氯化钠，这是一种既没有金属性又非气态，既没有毒又不具有爆炸性的化合物。除非人们能发现其中的规律，否则化学所能发挥的潜力便会受到局限。

这种混乱状态激发了俄国化学家德米特里·门捷列夫，他决定将人类所知的元素编排成一个体系。为实现这一目标，他首先依照原子量进行排序，这同样也是道尔顿提出原子论时所关注的一个物理属性。门捷列夫后来又加入了另一种归类方式，依据其他次要属性进行归类，比如

金属性和化学反应活性（该元素与其他元素结合的难易程度）。

门捷列夫的努力成就了第一份元素周期表（图 8）。在表格中，元素的原子量依照从左到右、从上到下的顺序依次递增。基本上，每一列都按照一个特定的化学属性进行归类，比如碱金属占一列，不易进行化学反应的惰性气体占另一列等。

门捷列夫开始这项工作时，有一些元素尚未被发现。因此，周期表中会留出了一些空白，这些空白是留给门捷列夫期待会发现的、拥有特定原子量和化学属性的元素，虽然这些元素在当时看来是否存在还是个未知数。凭借充分的自信，门捷列夫成功预言出了三种日后发现的元素。在这些元素的存在与否都尚未被证实的情况下，他就给出了它们大概的原子量及化学属性。其中最著名的一个预测是对一种他称为类硅的元素的成功预测，他将其排在元素周期表中硅和锡的中间。门捷列夫预

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
			Ni = Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	J = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

图 8　门捷列夫 1869 年的元素周期表。表中周期为列，族为行。原子量为 70 的就是锗（来源：*Zeitschrift für Chemie*，p. 406，1869）

测它会是一种金属，并拥有与硅和锡两种元素相似的属性。门捷列夫还进一步作出几项量化预测：其密度比水大 5.5 倍，其氧化物的密度比水大 4.7 倍，其外观是灰色的，等等。当类硅（后来被称为锗）这种元素于 20 多年后被发现时，人们发现门捷列夫的预测几乎丝毫不差。

元素周期表不只是科学中最伟大的组织方式之一，同时也具有重大的实践意义。如果某种化合物十分有用，但由于其原子构成而具备某些不期望的属性，那么可以通过用一种化学属性相似的原子来替换有问题的那种，以生成既能起同样作用又相对更好的一种化合物。比如，那些需要控制钠的摄入量的人可以选用所谓“轻盐”来代替食盐，在其中氯化钾代替了氯化钠。两种物质味道相仿，但对血压的影响则不同。

科学家常常以令人吃惊的方式来发展他们的理论。门捷列夫需要不断重新构造他的元素周期表，因为一开始他并不知道应该设定多少行多少列。然而一次次重复写下元素名称无疑会消磨任何人的耐性。因此，门捷列夫制作了一套卡片，每张卡片上写一种元素的名称和属性。通过把玩一桌子的纸牌，门捷列夫在尝试新的可能性时就变得更加方便和有趣了。[19 世纪时英国人对于纸牌的称呼之一就是 Patience（耐心），这一称呼确实非常恰当。]

阿伏伽德罗常数

将阿伏伽德罗假说、道尔顿原子论以及门捷列夫的元素周期表放在一起，差不多就构成了化学的大部分基石，但还不是全部。阿伏伽德罗又贡献了另外一块重要的基石，即阿伏伽德罗常数——1 摩尔物质中所包含的微粒数量。1 摩尔是指 12 克碳所包含的微粒数量。

阿伏伽德罗最初的表述预言了两种体积相同的气体含有的微粒数量也相同。显然这两种气体的质量并不相同，通过阿伏伽德罗常数，则可以将这两种测量方式——质量和体积用数学方式关联起来。最新测算的阿伏伽德罗常数数值是 $6.022\ 141\ 29 \times 10^{23}$。[7]

问题来了，那我们是如何知道的呢？最直接的方法可能就是找来 1 摩尔的气体然后一颗一颗数里面的分子。当然，这是不可能完成的任务，至少目前做不到，我们必须另寻他法。不过令人吃惊的是，方法其实有很多。现代科技的发展更令这一问题变得相对直截了当。首先寻找一种晶体结构为立方体的材料（比如硅），因此晶体中的原子在各个方向上彼此距离都相等。然后利用现代激光技术就能相当准确地测量出原子之间的距离，于是 1 摩尔物质的原子数量就可以很直接地计算出来了。这基本上和计算一片果园里的果树数量的道理一样，前提是果园里的树都成行成列地栽种，而且每行每列的间距都一样。

不过，激光的出现不过短短半个世纪左右。我第一次看到激光还是在电影《金手指》的经典桥段中，奥瑞克·金手指准备用激光将邦德切成两半。眼见激光就要切到身上了，邦德对金手指说："你想让我开口吗?"

"不，邦德先生，"金手指回答道，"我想让你死。"当然意料之中的是，邦德不会死。不过或许会出乎大家意料的是，科学家在激光发明之前很久就已经能够相当准确地测算出阿伏伽德罗常数了。

约翰·斯特拉特（瑞利男爵）进行过一项简单而巧妙的实验，确定了阿伏伽德罗常数的大致数量级。他将 1 毫克的油滴在水面上，让其散开来。油散开之后，覆盖的面积是 0.9 平方米，即 9000 平方厘米。已

知油的密度为 0.9 克每立方厘米，油的原子量为 282.5。由于油面散开至无法再扩散，所以最终得到的油层只有一个分子的厚度，而油层的体积则是一个分子的厚度 h 乘以油层覆盖的面积。同时油层的体积与最初 1 毫克油的体积相同，因此根据体积等于质量除以密度，可以算出油层的体积为 $0.001/0.9 \approx 0.0111$ 立方厘米。

我们可以将油层看成是一个圆柱体，圆柱体的底面面积为 9000 平方厘米，高为 h，体积为 1.111×10^{-3} 立方厘米，因此 $9000 \times h = 1.111 \times 10^{-3}$，于是 $h = 1.111 \times 10^{-3}/9000 = 1.234 \times 10^{-7}$ 厘米。假设一个分子占据的空间为边长为 h 的一个立方体（虽然分子形状并非立方体，但它所占据的空间则是一个立方体，就像装下一颗篮球需要一个方盒子的道理一样），借此我们可以估算出 1 毫克油中的分子数量。由于其体积为 1.111×10^{-3} 立方厘米，那么其中所包含的分子数量大约为 $1.111 \times 10^{-3}/h^3$。又由于 1 摩尔油的摩尔质量（克每摩尔）等于其原子量 282.5，所以 1 摩尔油的质量是 $282.5 \times 1000 = 282\ 500$ 毫克。因此，1 摩尔油中的分子数量，即阿伏伽德罗常数，则等于 $282\ 500 \times 1.111 \times 10^{-3}/(1.234 \times 10^{-7})^3 = 1.67 \times 10^{23}$。这个结果大概是如今最新测算数值的四分之一，虽然差距很大，但如此粗略的计算所能得出的结果也只能是这样了。

有些公式中存在一种潜在的美感，欧拉公式便是一个精彩的例子：$e^{i\pi} + 1 = 0$。除非你完全缺乏对美的感知能力，否则你不会对该公式的美妙无动于衷——当然我不会怀疑你对美的理解，因为你正在阅读这本书。这一美妙的公式结合了自然对数的底 e、圆周与直径的比 π、虚数单位 i 以及加法和乘法，所有这些元素均集合在一个精美的表达式中。这就好像一场摇滚演出，表演者包括是猫王、布鲁斯·斯普林斯廷、滚石乐队、沙滩男孩乐队还有 Abba 乐队——可能以上不是你最中意的五

个摇滚乐队或艺人，不过没关系，你可以随意按照喜好进行修改。阿伏伽德罗常数拥有与欧拉公式同样的魔力，在本书的后面我们还会再次接触到它。

6×10^{23}有多大？

在日常生活中我们不会遇到这么大的数字。现今美国的国债规模大约为 14 万亿美元，[8] 也就是 1.4×10^{16} 美元。如果世界上有大约 4 千 300 万个国家，每个国家都有那么多的债务，那么总的债务额大约就是 6×10^{23} 美元。但是很难想象地球上有那么多国家拥有像美国这样的生产力，却还没有走进星际文明的时代。不过就算进入了星际文明时代，同样也难以想象这个广阔的星际文明一边承受着如此巨大的债务，一边还能发展演进。

年轻时候，我曾读到过一个用来描述阿伏伽德罗常数的类比。如果将一杯普通大小的咖啡倒入海洋之中，并彻底搅拌均匀，然后用原来的咖啡杯盛一杯海水，那么这杯海水中将会含有原来那杯咖啡中的几个分子。因为海洋的体积与咖啡杯的体积的比是在阿伏伽德罗常数的数量级上。

另外还有一种更现代的看待方式。我有一台很新但很便宜的电脑，最近我在这台电脑上设置了一个定时循环，它能够在大约两秒钟的时间内循环一百万次（我设定好的）。我最早使用电脑编程是在 20 世纪 50 年代晚期，当时的电脑非常笨重，速度很慢，而且造价昂贵，只有企业才用得起电脑。因此，如今具有这么强大计算能力的机器就这么摆放在我的桌面上，而且只需要不到 1000 美元（包括周边产品），单这一点就足够令人惊奇了。一台性能稍快一点的机器，或者让我的机器全部用来计算，都能够达到一秒种循环一百万次的速度。如果我们用一台机器以

每秒一百万次的速度为分子计数，不妨看一下，它数出 1 摩尔理想气体所包含的分子数量所需的时间。宇宙的年龄大约为 140 亿年，即 $1.4\times10^{10}\times365\times24\times60\times60=4.4\times10^{17}$ 秒。那么假定自宇宙大爆炸时起就开始计数，到现在只能数出大概 4.4×10^{23} 个分子。因此，要数完 1 摩尔气体中的全部分子数量，还需要大概 50 亿年的时间。

注释

[1] 可参见 http://www.rationaloptimist.com/writings/cheer-life-only-gets-better（2011 年 1 月 3 日有效）。

[2] 可参见 http://inventors.about.com/od/nstartinventions/a/nylon.htm（2011 年 1 月 2 日有效）。

[3] R. Feynman, *Six Easy Pieces* (New York: Basic Books, 1995), 4。

[4] 网上浩瀚的资料总是会不断让我感到惊喜。这里是一篇对阿伏伽德罗论文的翻译，文章非常容易读，可不像牛顿的《原理》一书那么艰深。可参见 http://www.chem.elte.hu/departments/elmkem/szalay/szalay_files/altkem/Avogadro_cikk.pdf（2011 年 1 月 2 日有效）。

[5] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Cannizzaro_reaction（2011 年 1 月 3 日有效）。

[6] E. J. Holmyard, *Masters of Chemistry* (Oxford: Oxford University Press, 1953), 257。

[7] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Avogadro_constant（2011 年 1 月 3 日有效）。

[8] 可参见 http://www.usdebtclock.org/（2011 年 1 月 3 日有效）。这个网站十分精彩，也十分吓人，因为它上面是美国国债的实时数据。我登录的时候，上面显示的数字为 13 939 520 000 000美元。等你们读到这本书时，它大概已经超过 14 万亿美元了吧。



第 6 章

库仑常数

我跟电的第一次亲密接触原本可能就是我的最后一次。

不管怎样，我母亲是这么说的。鉴于她已经离世，无法为此作证或抵赖，我也乐意接受这一说法。那是在我三岁左右的时候，母亲突然发现我执意要将一根发夹插入灯座里。母亲马上做出反应，先以最大的音量警告我不要这么做，然后又用各种潜在的危险来吓唬我，吓得我时至今日，不论做多么简单的电路连接，我都要穿上橡胶鞋，戴上工作手套。所有认识我的人都觉得我这样做十分离谱，但如果在万有引力、电磁力、强核力和弱核力以外还有第五种作用力，我以为它非来自母亲的印记莫属。我不知道这种力与强核力相比如何，毕竟强核力是四种作用力中最强的，但在我看来，它绝对要比电磁力强大。而在本章中，我们将认识到电磁力到底有多么强大。

电和磁的早期岁月

当然这里要讲的是人类对于这些力的早期认识，而电和磁的出现是要追溯到宇宙大爆炸或大爆炸后极短的时刻。在耶稣诞生很久以前，人类就已经认识到电和磁。古希腊人了解到琥珀，即凝固的松脂，具有一种奇怪的特性：琥珀被摩擦之后，会变得能够吸附碎羊毛和线头。的确，electricity（电）这个英文单词便出自于希腊语的单词 elektron（琥珀）。天然磁石被人类认识的时间则更久。若使用天然磁石击打一小块铁，铁就会获取天然磁石所具备的磁性。当铁针获取了足够的磁性后，如果任其摆动，它会自然地指向南北方向。正是磁的这一属性，才造就了一项极其伟大的发明——指南针。

人类历史上的第一个指南针大概是中国人在两千多年以前所发明的，而在欧洲，到了 12 世纪的时候在航海活动中已经有使用罗盘的确

切记载。千百年来，指南针的造型相对来说都很简单，一根磁针架在一个尖的支点上，底座上固定有一张卡片，卡片上印着四个基本方位（东南西北）和一些中间方位（西北、西南偏南等）。磁针能够自由摆动，由于其总是指向南北方向，将卡片上的北方转到指针的位置，方向便确定了，据此确定出的方向精确度还是非常高的。

而电的普遍使用则要晚得多。电和磁之间关键的不同之处就在于电现象是转瞬即逝的，而磁现象则是永久存在的或者几乎如此。磁现象的长久性不仅使得人们能够对其加以利用，同时也能让人们更容易对其进行研究。人类历史上第一个对磁进行严肃研究的人是威廉·吉尔伯特。

威廉·吉尔伯特

“通才”这个词如今用来很尊敬地指称那些拥有两种彼此相距很远的才能的人。众多 14 ~ 17 世纪的伟大思想家都是名副其实的通才，其中最典型的可能就是达·芬奇了。威廉·吉尔伯特也是其中之一。他或许远没有达·芬奇的名声响亮，但他为科学进步所作的贡献更加重要。

吉尔伯特生于科学史上划时代的 16 世纪。当时维萨里刚刚出版了解剖学的奠基式著作，而哥白尼则因其宇宙观引发了一场知识风暴。不幸的是，哥白尼的某些信徒，比如布鲁诺，更是被真实的风暴所波及——他因其异端理论而被处以火刑。在英国，思想的传播则更为自由，吉尔伯特曾是一位哥白尼理论的早期阐释者，同时也是一名皇家医师。

除了行医以外，吉尔伯特对于磁和电现象十分感兴趣，并发表了该领域第一篇重要论述《论磁石》。在这本书中，吉尔伯特准确地指出地

球是一个巨大的磁石，由此解释了磁针总是指向南北方向的原因。同时，吉尔伯特也描述了电，他将之称为 vis electrica，并事实上设计出了第一台电表：他利用一根绕轴旋转的针（取自指南针）来测量不同物质能被电吸引的相对能力。吉尔伯特写道："电素与空气大不相同，正如空气是地球散发的，带电体同样也拥有自己专属的电素；每一种电素都有回归其本源，回到发射出电素的物体的趋势。"[1]

吉尔伯特也注意到了电与磁在表现上的一些重要差异。他指出，电的吸引力会因为加热而消失，但磁的吸引力则不会。于是他得出结论，这两种作用力是不同的。这一点实际上并不正确，首先物体的磁性在极高温下也是会消失的；而更重要的则是之后所发现的，这两种现象实际上是同一种力的不同表现。尽管如此，吉尔伯特的研究仍然为人类文明朝向利用电迈出了重要的一步。不幸的是，下一步却要一直等到吉尔伯特离世两百多年后才接续下去。

亚历山德罗・伏特

要研究电，科学家需要以更可靠的方式来创造出更高质量的电，同时需要找到储存电的方法。后一个困难已经被攻克，只是攻克者并非人类，某些鳗鱼和其他鱼类能够释放出强力的电击。而第一款可靠的、能够储存很多电的人造电源产生于 17 世纪，发明者为奥托・冯・格里克。冯・格里克同样是一位通才。学习了数学、法律和工程学以后，他在三十年战争期间被迫离开家乡马德堡。在返回家乡后，他帮助重建城市，并当选为市长，后来就进行了两项举世闻名的科学实验。他发明了一个叫做马德堡半球的装置，用来演示真空的存在及其强大的力量，同时，他也发明了第一台大型静电起电机（图 9）。该装置是一个巨大的硫磺

球，中间有一根木轴。通过一根曲柄转动硫磺球，并用干手去摩擦，这样便可在硫磺球表面产生电荷，之后还可以将这些电荷带到其他地方进行研究。

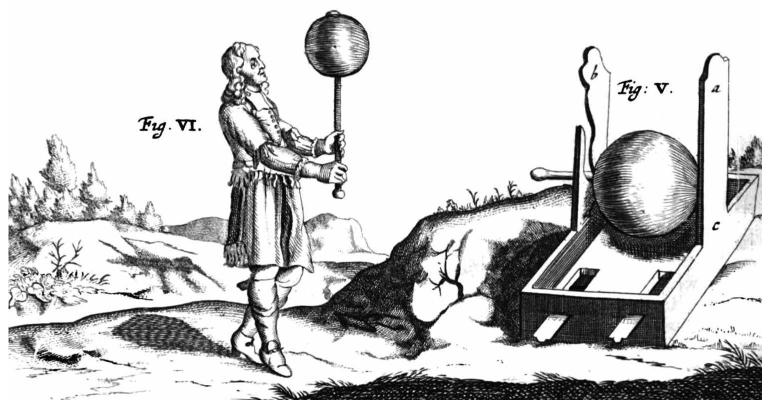


图 9　冯·格里克的静电起电机（来源：*Experimenta Nova*（*ut vocantur*）*Magdeburgica De Vacuo Spatio*，p. 148，1672）

尽管冯·格里克做出了这样的装置，但直到 18 世纪，对于电的试验和发展的脚步才真正加快起来。莱顿瓶是这一过程中第一项伟大的发明。作为一种储存电的装置，莱顿瓶能够储存大量的电，这些电足够用来杀死小动物。莱顿瓶能够彼此连接起来，即今天我们所说的“并联”，这样便可增加电释放时的电流。正如富兰克林的著名实验所做的那样，莱顿瓶同样可以用来证明闪电是某种形式的电。闪电的威力是显而易见的，人们认识到闪电是某种形式的电后，便设计出一种利用闪电的方式将闪电储存起来，这种方式可以同时充满多达 50 只莱顿瓶。

另一项重大进展是人类找到了另一种获取电的方式，要比摩擦两个物体更加容易，也比“使用瓶子捕捉闪电”更加安全（对我们来说这

只是比喻，而对本杰明·富兰克林等人来说则是实实在在的操作)。科学的进步有时来自于意外，当路易吉·伽伐尼在实验室中用一把连接着静电起电机的手术刀意外触碰到旁边一只青蛙的大腿肌肉时，青蛙的肌肉抽搐了一下，伽伐尼由此开始了对他称为生物电现象的深入研究。他以为自己找到了哲学家和科学家搜寻已久的“生命力”。当伽伐尼在青蛙腿上缠绕铜丝并将其固定在天台外的铁栏杆上时，意料之外的事情再次发生了。青蛙腿又抽搐了一下，情况和之前带电的手术刀触碰时一样，但这次并没有明显的电源存在。伽伐尼发现当缠绕在青蛙腿上的金属丝与栏杆为同一材料时，这种抽搐就不会发生，他从而发现了通过将不同的材料聚在一起来产生电的方式。

这一发现在亚历山德罗·伏特（电的历史上最伟大的名字之一）手中结出了丰硕的成果。对于通过不同金属材料的物理接触而产生电这一现象，伏特进行了系统的探索。作为一名谨慎的实验科学家，伏特测试了许多金属材料，并制作了一份有序的清单，其中每一种金属材料都能与上一行的金属材料搭配产生正电荷。他同时指出，当他把两种不同的金属放入嘴中时，他的舌头会因为电流的经过而感到刺痛。另外，他发现用盐水打湿材料，会促进电流在金属与金属之间的流动。于是，他将不同的金属材料堆垒起来，各层之间隔以打湿的纸板，用来放大每对金属材料所产生的微弱电压。这就是伏打电堆（图 10），它的基本原理与今天我们在便利店购买到的电池已经没有太大的差别。

至此，科学上终于获得了一种稳定而持久的电源。莱顿瓶的问题在于只能一次性释放所有电量，就像一支篮球队在大学篮球联赛的第一轮就输球出局。虽然这或许能用于许多小花招，比如点火引爆（如今，该功能仍然依靠电完成），但它大大限制了电的潜在功用。因此，虽然最初的伏打电堆所能存储的电量相比莱顿瓶不过是九牛一毛，但它为电的

生产和使用的军备竞赛打响了第一炮。

伏特给皇家学会的约瑟夫·班克斯爵士写了一封信，介绍了伏打电

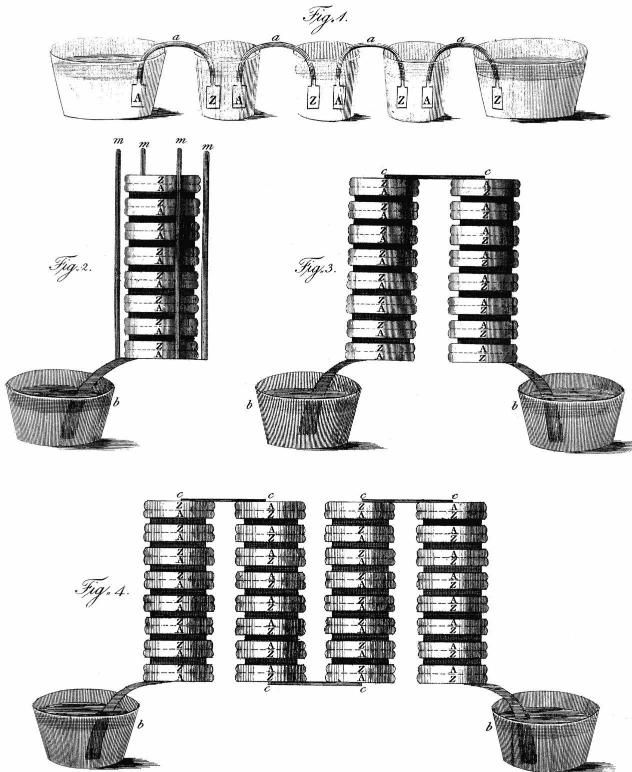


图 10　亚历山德罗·伏特在 1800 年制作的伏打电堆，由银板和锌板构成一个单元，在单元之间夹以浸有盐水的纸板作为电解质。虽然伏特认为电流源自银板和锌板的化学反应，但事实上电流是源自锌板和电解质之间的化学反应（来源：*Philosophical Transactions of the Royal Society of London*，vol. 90，p. 430，1800）

堆的成形过程以及他对此的结论。这封信于 1800 年 6 月 26 日在皇家学会被宣读，这一日期标志着电实用化的正式开端。然而，伏特并不知道伏打电堆中电的来源何在，对这一装置的全面认识则还要等上几十年的时间。电池的工作原理是通过化学反应释放电荷，遵循了能量守恒定律以及热力学定律。能量守恒定律指出，能量既不能被创造，也不能被消灭。因此，从伏打电堆中产生的能量必须有迹可循。热力学定律则指出，能量能够由一种形式转换为另一种形式，但在转换过程中，不可避免会损失一定的能量。就像兑换货币的掮客在为你将美元兑换为欧元时，总要收取一定的费用，宇宙也会在化学能转化为电能时收取一定的费用（以能量的损耗来计费）。

夏尔·奥古斯丁·库仑

在实验科学家努力寻找新的电生成和储存方式的同时，其他人则在试图解释和理解这些方式。幸运的是，在物理学理论界，已经存在一个金字招牌，即牛顿的万有引力定律。牛顿已经提出任何两个物体之间的万有引力与它们的质量成正比，与它们之间距离的平方成反比。这一结论可能来源于两个基础性假说。其一，如果其中一个物体的质量加倍，那么两个物体之间的万有引力也会加倍。其二，不管万有引力到底是什么，由于其来源于一个点，它的作用范围是以此为中心的一个球体。又由于球体的表面积与半径的平方成正比，所以如果两物体之间的距离加倍，那么万有引力作用的球体表面积就要增加为原来的四倍，从而将另一物体受到的万有引力稀释为原来的四分之一。

以上是我不自量力假想牛顿当年的想法，但这并非不是一种合理的假设，而且既然我会这么想，很可能其他人也这么想过。不管怎样，电

和磁也可能遵循同样的假说：当其中一个物体的电荷或磁荷加倍后，其间的作用力也会加倍，而当两个物体间的距离加倍后，其间的作用力也会变为之前的四分之一。

18 世纪的法国物理学家夏尔・奥古斯丁・库仑对此进行了实验，成功证明静电力的这些假设。库仑的主要研究工具我们在前面已经见到过，那就是由约翰・米歇尔设计、被亨利・卡文迪许拿来称量地球重量的扭秤（图 11）。库仑的任务要比卡文迪许轻松许多，因为静电力要比万有引力

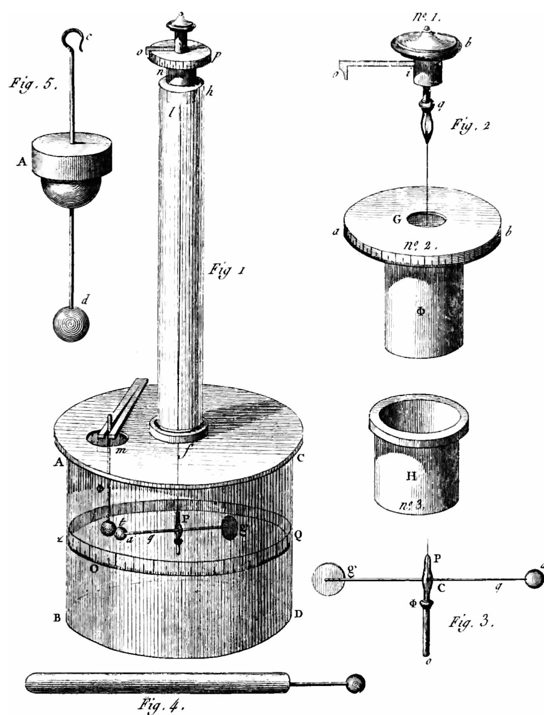


图 11　库仑的扭秤（来源：*Histoire de l'Académie Royale des Sciences*，p. 576，1785）

的强度大得多。实际上，因为静电力非常强，即使很小量的电荷或磁荷所引发的扭秤偏转也能在实验室（甚至在高中的实验室）很轻易地测量出来。

库仑将他对于静电力强度的研究写成众多报告。下面这些数据就来自他的《第一份报告》，[2] 在这里他向两个木髓球注入同性电荷，并测量两者的间距变化。我对库仑所得出的数据进行了很大程度的简化，简化后的数据如下。

同性电荷的作用力研究

初始间距	带电间距
36.0	36.0
18.0	144.0
8.5	575.5

三次测量过程中初始距离依次减半（或近乎减半），而带电后的间距则依次递增为前次的四倍，正如与距离平方成反比的假设所预测的。近一个世纪后，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（他日后成为有关电磁的一切事物的最终仲裁者）在评论库仑时说道："其设备的精致度和独创性、其观察的准确度以及其研究方法的科学性，是再怎么高估都不为过的。"[3]

实际上，米歇尔、卡文迪许以及库仑的研究之间存在紧密关联。库仑最初的兴趣是在扭力上，那种由米歇尔设计、被卡文迪许使用的扭秤很有可能是库仑最早设计的。卡文迪许曾于 1798 年在《自然科学会报》中承认了库仑的贡献："许多年前，约翰·米歇尔……精心设计出了一种方法，利用小质量物体之间微弱的吸引力来测算地球密度。但由于他一直忙于其他工作，直到去世前不久才完成了这一测量仪器……库仑先

生在不同场合已经使用了类似的装置进行微弱吸引力的实验。”[4]

为何静电力与万有引力的差异如此之大

牛顿的万有引力定律是 $F = GmM/r^2$，其中 m 和 M 是两个物体的质量、r 是两者间的距离、G 为万有引力常数。库仑定律则是 $F = kqQ/r^2$，其中 q 和 Q 是两个电荷的电量、r 是两者间的距离、k 是库仑常数，其确切意义和数值我们会在之后的几页中介绍。虽然万有引力和静电力的力学定律在数学表达方面看上去一模一样，但这两个公式所描述的现象之间却有几项重要的差异：质量 m 和 M 只能为正值，万有引力也永远是相吸的，每个物体都会吸引所有其他物体；而电荷 q 与 Q 则可正可负，电荷之间也有时相吸（当 q 与 Q 符号不同时）有时相斥（当 q 与 Q 符号相同时）。

从以上两个事实中可以得出一个结论，每一个人都具有万有引力，因为我们的质量都是正值，同时每一个人又都是电荷中性的，既不吸引也不排斥其他带电的物体（除了一些特殊情况，如冬天在毛毯上走路会产生静电），因为我们身体内粒子的正电荷和负电荷数量相等。根据万有引力理论和静电力理论的预测，拥有净万有引力荷（即质量，也就是宇宙中的一切事物）的物体和拥有净电荷的物体在表现上会有所不同。万有引力荷互相吸引，正如牛顿指出的，任何物体产生的万有引力都可以视为是从其重心发出的。另外，由于质量之间彼此吸引，这也解释了为何地球熔化的铁核会聚集在中心位置，而不是漂浮在表面形成一片铁海汪洋，使生命无法存活。

然而，库仑表明，就如同同性电荷相斥，一个物体所具有的任何净电荷都会尽可能地远离该物体上的其他电荷。因此，净电荷总是散布于

物体表面。尽管库仑已经在实验中注意到了这一现象，他还是在他的《第四份报告》[5] 中通过定理证明了这一点。那些不相信这些数学定理的人恐怕要付出现实的代价，以下是与库仑定理相关的一些救生建议：如果开车路上碰巧遭遇闪电，一定要待在车里！哪怕你的车被闪电击中，由此获得了净电荷，这些电荷也只会散布至车身表面。只要你待在车内，不去触碰任何连到车身的导体，你就不会有事。这一现象由尼古拉·特斯拉亲身演示过，他在一个“闪电笼子”内镇静地读着书，而周围便布满了巨大的人造闪电。

汉斯·奥斯特、迈克尔·法拉第以及电磁感应

在任何关于电的历史的陈述中，即使是十分简练的历史，就像本章这样，也不会漏掉两项关键的实验。这两项实验对普通人生活的影响之大，应该超过人类历史上的任何其他事件。第一项实验是由丹麦物理学家汉斯·奥斯特实施的，他在 1820 年发现在靠近指南针的地方控制电流开关会造成指针的摆动。由于指南针的指针通常只在磁场中才发生相应的摆动，所以这表明开关电流能够产生磁场。当然，“场”这个词在当时还没有被用来描述磁性和电荷行为，场的概念来源于迈克尔·法拉第，也就是我们所要回顾的第二个实验的实施者。

11 年后，法拉第将奥斯特的实验掉了个个。他想，既然电流能够影响磁铁，那么磁铁或许也能用来影响电流。法拉第最终所取得的成功远远超出他的想象，他发现当一块磁铁进出一个线圈，不断改变磁场位置时，线圈中便会产生电流。这就是我们所知的电磁感应原理，同时也是发电机的基本工作原理。我不禁好奇到底是什么原因导致了奥斯特的实验和法拉第的实验之间间隔了 11 年。电流的产生要求磁场的变化，而

无法认识到这一点可能是造成这 11 年耽搁的原因之一。

借助于廉价而普及的电力，我们的社会财富极大增加，而这一切正是得益于法拉第的发现。有了他的发现，我们才能够利用重力和太阳的能量。太阳光使海水蒸发，水汽上升冷却变成雨雪落回大地。而重力则使水奔流而下，于是我们便可以通过在水坝中安装发电机的方式利用这一能量。发电机发出的电能够通过线缆高效地传输至远离水坝的地方。而当我们为一台装有电动马达的设备插上电源时，电流驱使磁体转动，从而带动设备运转。这样，太阳的热能蒸发的水汽最终驱动了发电机。当然，我们还通过煤炭、石油、天然气以及核能加热产生水蒸气，以此来驱动发电机获取电力。

法拉第对于他所研究的电和磁拥有一种敏锐的直觉。许多伟大的科学进步都依赖于将现象概念化的新方法。比如，法拉第将电和磁视觉化，将其视为弥漫在空间中的电力线和磁力线，其中作用力较强的区域线条更为密集。这种将电和磁视觉化的方法引出了场的概念，这是物理学中一个非常重要的数学化描述。在此我们只能浅尝辄止，场的理论已经超出了本书内容的范围。

静电力和万有引力的相对强度

我阅读过大量的科学读物，毕竟我对科学非常痴迷。关于静电力和万有引力的相对强度，我读到过一些不同的数字。杰出的科学家马丁·里斯（他得的奖比我握过的手都多），对于静电力是万有引力多少倍这个问题，所给出的答案是 10^{36}。不过，我更倾向于 10^{39}，这个数字我在多个地方都见到，而且它对我来说也最具说服力。下面就让我来试试看能不能讲得让你也信服。

一般来说，最自然的比较出现在彼此相似的事物之间。在此我以纽约西敏寺犬展为例。每一年，主办方都会评选出每个犬种中的最佳狗狗，同时也会选出一只全犬种的冠军狗。对我来说，评选年度最佳比格犬或最佳金毛寻回犬都合情合理，但拿比格犬去跟金毛寻回犬比较就让人摸不着头脑了。“物以类聚”似乎更可靠一点。

那么这又跟比较静电力和万有引力有什么关联呢？事实上，万有引力永远是相吸的力，而静电力则既会相吸也会相斥，取决于相关的电荷是同性还是异性。比较万有引力与一个相斥的静电力的强度，我对这活儿也有点相斥。同时，我偶尔会去健身房健身，所以我知道同样的肌肉配置在进行拉和推的动作时能使出的力量是不同的。因此，公平的方式应该是选择一个相吸的静电力来进行比较，在此我们选取一个电子（负电荷）和一个质子（正电荷）。

库仑定律 $F = kqQ/r^2$ 中的 k 与我们在第 1 章中看到的大 G 的功能很像。正如在确定 G 的数值的道路上，科学家付出了艰辛的努力，在确定 k 的数值方面也是一样。不过，为了接下来叙述和计算的方便，我们直接在此给出数值 $k = 9 \times 10^9$ 牛顿二次方米每二次方库仑。

至于两个电荷之间间隔多远并不需要特别考虑，因为两个公式的分母上都有一个 r^2，所以在进行比例运算时该系数将被抵消掉。为思考方便，我们假定电子和质子间隔一米的距离。

1 库仑是大约 6.24×10^{18} 个电子，所以每一个电子所带的负电荷为 $1/(6.24 \times 10^{18}) = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑。质子拥有同样大小的正电荷，因此两者之间的静电力为 $kqQ/r^2 = 9 \times 10^9 \times (1.6 \times 10^{-19}) \times (1.6 \times 10^{-19})/1^2 = 2.3 \times 10^{-28}$ 牛顿。这一数值可能已经很小了，但质子（质量为 1.67×10^{-27}

千克）和电子（质量更小，9.11×10^{-31}千克）之间的万有引力则比这个数还小很多。通过计算，可得出两者间的万有引力为 $GmM/r^2 = 6.67\times10^{-11}\times(1.67\times10^{-27})\times(9.11\times10^{-31}) = 1.01\times10^{-67}$牛顿。因此，静电力和万有引力之间的比值为 $2.3\times10^{-28}/1.01\times10^{-67}$，约为 2.3×10^{39}。

当然，我们得记住，使用不同的微粒来作比较时会得出不同的比率。如果有人决定拿相斥的力进行比较，那么是选取电子和电子的配对还是质子和质子的配对？静电力的相斥的力和相吸的力是同样大的，但由于质子比电子大约重 1800 倍，因此两个质子之间的万有引力就将会是两个电子之间万有引力的三百多万倍。

不过，这并不是我说要“物以类聚”的唯一原因。另一个原因是，正负电荷微粒之间的引力在我们日常生活中的地位非常重要。日常生活中充斥着化学反应，而化学反应正是电子在原子之间进行转移的过程。如果静电力与万有引力之间的强度比更小的话，我们今天视为理所当然的生化过程将会相应变得困难许多。比如走路，这个通过生化过程短暂克服重力的行为，将变得更加辛苦。这并不是说我们因此就不能走路了，而是我们的肌肉系统必须要比现在强壮许多才行。不过这种猜测并不十分确定，我们无法知道是否能够演化出这样强壮的肌肉系统，因为我们无从比较，不知道在这种状况下生命将会如何演化，甚至是否能够演化。同样地，如果这一比例变得更大，那么我们在寒冷冬日触摸金属门把所产生的静电，可能就不只是让我们不舒服而已，而很可能会威胁到我们的生命。

当然也可能不会，那时物种大概会进化出相应的适应机制。对此，我们完全无法预料，就算能通过科学实验来展示生物体将如何应对更强

或更弱的电场或磁场，但在进行这些实验的环境中静电力永远是万有引力强度的 10^{39} 倍，这一点是我们无法改变的。我们所能做的，就是对这一结果心怀感激，因为这造就了现在的我们。

注释

[1] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/William_Gilbert_(astronomer)（2011 年 1 月 5 日有效）。

[2] C. Gillmor, *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France* (Princeton: Princeton University Press, 1971), 185。

[3] 同上，第 207 页。

[4] 同上，第 164 页。

[5] 同上，第 198 ~210 页。



第 7 章 波兹曼常数

我记得童年生活中许多事情都涉及各种各样的科学知识，但其中却少有关于热的记忆。只有一次，我不小心被熨衣架上的熨斗烫了一下，留下一小块三角形的伤痕（母亲在我的伤口处抹上黄油，冰块在当时还不是一种万灵药），从此知道在靠近高温物体时要小心谨慎。我还记得小时候一直疑惑为什么洗热水澡那么令人舒服，而潮湿的天气却不然。我找来父母给我量体温的温度计，把它插进装满热水的浴缸里，发现水温竟然还没有我发烧时的温度高。我父亲是一个知识渊博的人，他跟我解释之所以潮湿闷热的日子会让人不舒服，是因为人体通过出汗的方式进行自然降温，而在潮湿的日子里排汗会变得比较困难。并且，如果洗热水澡时水温低于 310 开尔文（36. 8 摄氏度，大约等于人类的体温），当你泡在水中时，热量仍会从你的身体传导至水中，同时你还会排汗（从那些未泡在水中的身体部位）。还有一些问题的解答则可能超出了科学范畴，比如为何男性更喜欢淋浴，而女性则钟爱沐浴。如果说有一点我们是知道的，那就是热量。

燃素说与热质说

对热的研究和对光一样，长期以来都是科学界的要务之一。我们知道，古希腊人认为火是构成世界的基本元素之一，又由于火和热是无法区分的一体，于是热也被视为是一种物质。上千年以来，人们都将此视为一个严肃的观点，而在后牛顿时代第一个以此观点为基础的理论便是燃素说，该理论由约翰·贝歇尔创立，并由格奥尔格·施塔尔在 17 世纪晚期进一步发扬广大。该理论认为可燃物中含有一种无色无重的物质——燃素，该物质在燃烧时会被释放出来，燃烧后的物质即被视为去燃素化，而易燃物则是含有丰富燃素的物质。

我们回顾历史时，对一个错误的理论进行批判是很容易的。然而燃素说确实在某些程度上解释了燃烧以及生锈等现象，铁的生锈看上去似乎是获得了什么东西。而当一种物质在密闭的空间，比如钟形瓶中燃烧时，燃烧很快会终止，这一现象可以解释为空气已经吸收了最大限度的燃素，就像一块海绵，吸足水后就无法再吸水了。同时，燃素说还指出当物质在密闭的空间内燃烧之后，活物在其中便无法呼吸，因而燃素说似乎也部分解释了呼吸的道理——当空气吸足燃素后，动物便无法进行呼吸。

如今我们知道物质能够燃烧是因为氧气的存在，这一事实是由法国化学家安托万・拉瓦锡在一个世纪后经过实验所得出的。这一发现也是整个繁忙的化学世纪的成果。当时，气体作为元素已经能够被分离出来并进行研究，测量设备也能够精确测出气体的重量，因此拉瓦锡才能够在实验中证明空气中所损失的氧气的重量刚好就是燃烧物燃烧后所增加的重量，而且如果氧气被抽离，物质则无法燃烧。自此，人类告别了燃素说，进入了热质说的时代。

拉瓦锡的热质说提出，一种流动的、叫做热质的物质才是热物质，而宇宙中所含有的热质的量是恒定的，热质总是从更热的物体流向更冷的物体。根据拉瓦锡的说法，一杯热咖啡会慢慢冷下来，是因为其中多余的热质外流，进入到周围的空间里，而气体受热膨胀则是因其吸收了热质体积才变大的。虽然热质说并不正确，但它能够很好地指导对于混合物的最终温度的计算。不管怎样，热质说都要比燃素说进步得多，其中的某些元素甚至一直延续到了今天。

通过几个混合物的问题我们就能看出燃素说的价值所在了。假定 1 克水的温度每提高 1 摄氏度，便获得一个单位的热质，而每降低 1 摄氏

度，便损失一个单位的热质。如果我们将 100 克 40 摄氏度的水和 50 克 10 摄氏度的水混合起来，那么混合物的水温 T 将是多少？100 克 40 摄氏度的水将损失 $100\times(40-T)$ 个单位的热质，同时，50 克 10 摄氏度的水将获得 $50\times(T-10)$ 个单位的热质。由于高温水损失的热质等于低温水增加的热质，所以可以得出以下等式：

$$100\times(40-T)=50\times(T-10)$$
$$4000-100T=50T-500$$
$$4500=150T$$
$$30=T$$

因此，混合物的最终温度为 30 摄氏度。如果我们用的不是 100 克的水而是 100 克 40 摄氏度的铝，通过实验，混合物的最终温度为 19 摄氏度。显然，铝在热质增加和减少的比率上与水是不同的，那么假定 1 克铝的温度变化 1 摄氏度时所获取或损失掉 c 个单位的热质。50 克水会获取 $50\times(19-10)=450$ 个单位的热质，而 100 克的铝则会失去 $c\times100\times(40-19)=2100c$ 个单位的热质。同样地，两边划等后，可得出 $2100c=450$，即 $c=450/2100=0.214$。

热质（Caloric）最终演变为了卡路里（calorie），即能量的单位。虽然卡路里在现代计量体系中已被焦耳所取代，不过在食物领域它仍然是代表热量的主要单位。1 卡路里的热量即是使 1 克水升高 1 摄氏度所需的热量（约 4.2 焦耳）。在写这一章时，我所吃的小松糕含有 80 千卡热量，所以小松糕所含的热量能将 1 千克水从 10 摄氏度加热到 90 摄氏度。上一段中我们计算出的 0.214 这个数字实际上是一个叫做比热的参数，水的比热为 1.000，铝的比热为 0.215（实际上，最终铝水混合物的温度应该是 19.02 摄氏度，在上文中，为了计算方便，我只取了整数

位)。这表示，将 1 克铝的温度升高 1 摄氏度只需要 0.215 个卡路里。这也解释了为何使用铝壶烧水时，即便水远还没有烧开，但如果我们用手去触碰铝壶还是会被烫伤。

力、功、能量

力能够改变事物。人们对于力的第一印象就是力会改变物体的位置：重力会使树上的苹果掉落下来，电力会吸引异性电荷而排斥同性电荷。不过，牛顿的惯性定律似乎讲得更深一些：一个运动的物体会以均速一直运行下去，除非受到外力作用。力所能做的就是改变一个物体的动量。动量即质量与速度的乘积，由于质量不会改变，所以除了与爱因斯坦相对论相关的例子以外，力所产生的净效果就是改变一个物体的速度。速度的改变我们称为加速度。

你需要施加一个力才能将一个重 3 千克的物体（在地球表面时，重 29 牛顿）[1]提升至距离地面 2 米的位置。物理学家将此行为中所做的努力量化为 $2 \times 29 = 58$ 牛顿米的功。如果一个恒定的力 F 持续作用一段直线距离 d，那么总的功 $W = F \times d$。通过运用微积分，我们能将这一基础公式普遍化，使之适用于力非恒定、路径也非直线的情境，比如提着满满的一桶水顺着旋转楼梯上楼。

那么能量在哪里呢？到底什么是能量？energy（能量）这个词源自希腊语 energeia，意思是“活动”或“工作”。第一位将“能”量化的人应该是戈特弗里德·莱布尼茨，他是牛顿的同时代人，也是在微积分发明者问题上的竞争者（实际上，他们二位几乎是同时产生许多相同的观点，不过人们一般将荣誉归于了牛顿）。

其实要推导出能量并不困难。假定一个质量为 m 的物体以恒定的加速度 a 运动一段时间 T，使得物体的速度从最初的 v 加速到最终的 V。这时施加在该物体上的力为 ma；假设该力使物体移动了一段距离 D，那么总的功应该为 maD。由于加速度是恒定的，$V=v+aT$，所以$a=(V-v)/T$。速度以恒定的比例逐渐增加，那么物体在时间 T 中运行的距离可以通过平均速度和时间的乘积计算出来，即$(V+v)/2$ 乘以 T。于是：

$$
\begin{aligned}
W &= maD \\
&= m\times(V-v)/T\times((V+v)/2)T \\
&= 1/2m(V-v)(V+v) \\
&= 1/2mV^2 - 1/2mv^2
\end{aligned}
$$

因此，力所做的功就是 $1/2mV^2$ 和 $1/2mv^2$ 的差。整个过程就像是我们用这个差值来交换所完成的工作，好比我们在星巴克买一杯咖啡，就等于将购买前的财富与购买后的财富的差值拿来交换了一杯咖啡。

$1/2mv^2$被称为动能，它只有在物体运动时才会产生，因为当物体静止时，$v=0$。速度是相对于某个特定的参照系而言的，动能也是一样。如果你在一辆以 90 千米每小时运行的汽车中坐着不动的话，相对于这辆汽车而言，你的动能为零，但相对于路面而言，则是一个非常巨大的动能。因此，一旦发生撞车事故，你的动能必须转移至其他地方。对你来说，将动能转移至安全带或安全气囊上，要比将其转移至汽车仪表盘或挡风玻璃上好得多。

在以上运算中，还有另外一种能量并没有被涵盖进来。爱因斯坦在他的《物理学的进化》[2]一书中对此给出了一个很好的例子。想象过山车在轨道最高点时处于静止不动的状态。它完全没有动能，因为相对于

轨道来说它的速度为零，但它具有巨大的势能。这时重力会发挥它的作用，将过山车拉下来。而等到过山车抵达轨道最低点时，来自于重力的部分能量会转化成动能，使过山车逐渐达到其最高速度。过山车继续运行，动能将慢慢损失掉，其运行速度也会减慢。但随着过山车逐渐远离地面，其动能会转化为地球引力所赋予的势能，动能减弱的同时势能在增加。随着过山车上上下下地运行，两种形式的能量会交替转化，循环往复。

但过山车最终总会停下来。一开始它似乎会永不停止地运行下去，而对于有些硬着头皮乘坐过山车的人（比如在女朋友面前不得不充好汉），它总好像会无限飞驰下去。然而，这里面除了动能和势能以外还有另外一个选手参与其中，即摩擦力。火车在轨道上运行时所产生的摩擦力会令轨道发热，这一道理在 19 世纪晚期为现代热力学理论的发展指明了方向。

热力学第一定律

本杰明·汤普森爵士的一篇论文为“热是一种物质”的理论敲响了丧钟，汤普森更为人知晓的头衔是伦福德伯爵。（我不知道为何拥有头衔的科学家总是以他们的头衔知名于世，而非他们的姓名。我猜这是一种欧洲特色吧。）伦福德是一位来自新罕布什尔州的效忠派分子，在独立战争结束后逃离美国。他曾在慕尼黑调查过大炮的制造过程。当时，大炮还是通过往一根钢柱中钻孔的方式来制造的。打钻过程中产生的碎屑温度极高，伦福德实际测量了这些碎屑的温度。他认为，如果依照热质说，认为热是一种物质，那么热量应该不会无限制地产生，而从大炮的钻孔过程中，热量的产生似乎就是无穷无尽的。1798 年，伦福德发表

了他最重要的一篇科学论文《对摩擦生热的实验探讨》[3]，在其中他给出了他的观察和假说。对于那些坚信热是一种物质的读者来说，这篇论文无疑是当头一棒。伦福德写道："几乎无庸赘述，如果任何隔绝的物体或物体的集合均能无限制地生成某种东西，那么这种东西绝不可能是一种物质；对我来说，很难想象（如果不是完全不可能的话），除了运动之外，还有什么东西能够以实验中热量生成和传播的方式进行生成和传播。"[4]

伦福德想的没错，但他并没有意识到在具体哪些方面他是对的，他也没有意识到这一发现会带来什么样的结果。如果说 17 世纪的标志是力学的诞生，18 世纪的标志是化学的发展，那么 19 世纪的标志就是人类对各种形式能量的认识和利用。

詹姆斯・焦耳在这场革命中发挥了重要作用。焦耳出生在一个相当富裕的酿酒业家庭，因而他和哥哥得以受教于著名科学家约翰・道尔顿。尽管许多伟大的科学家和数学家为了增加收入都从事过教书的工作，但这种师生关系几乎就如同亚历山大大帝请亚里士多德教授几何学一样。尽管道尔顿两年之后不幸中风，但他对于科学和研究方法的强调在焦耳身上产生了深远的影响。

焦耳的最大贡献在于他认识到不同形式的能量是等价的，这就像不同形式的货币是等价的一样。美元和欧元是不同形式的货币，它们模样不同，但在根本上两者之间存在一个兑换比例，使得即使以不同的货币标价，我们也能对价格进行比较。焦耳在他于 1845 年发表的经典论文《论热功当量》[5]中清晰陈述了他的发现。他写道："用来带动磁电机的机械力在电流经过线圈的过程中，转化为了热量；另一方面……磁电机的动力则来自电池中所发生的化学反应。"[6]

焦耳打造出了一个十分简单的装置（图 12），通过重物的下坠带动浸在水中的转轮转动。从重物下坠所获得的机械能通过搅动容器中的水而转化为热量，焦耳通过一系列测算，得出了这一转化的比率。如今，我们很难想象科学家和酿酒师之间会发生科学上的对话，但在 19 世纪的英国，两者之间倒是可以更加自由地交流。日后成为开尔文男爵的威廉・汤姆森便听过 1847 年焦耳为英国科学促进协会所做的一场演讲，当时他刚刚被格拉斯哥大学授予自然哲学教授。汤姆森对焦耳的研究产生了兴趣。同年，焦耳迎娶了阿梅莉亚，两人前往夏蒙尼度蜜月，碰巧在那里遇到了汤姆森。虽然焦耳显然是位罗曼蒂克的丈夫，不过他还是中断了蜜月，开始和汤姆森一起测量当地一个 360 多米高瀑布的上下温差。我没有找到任何关于阿梅莉亚所做反应的记录，不过也没发现此事对他们婚姻产生了什么负面影响。

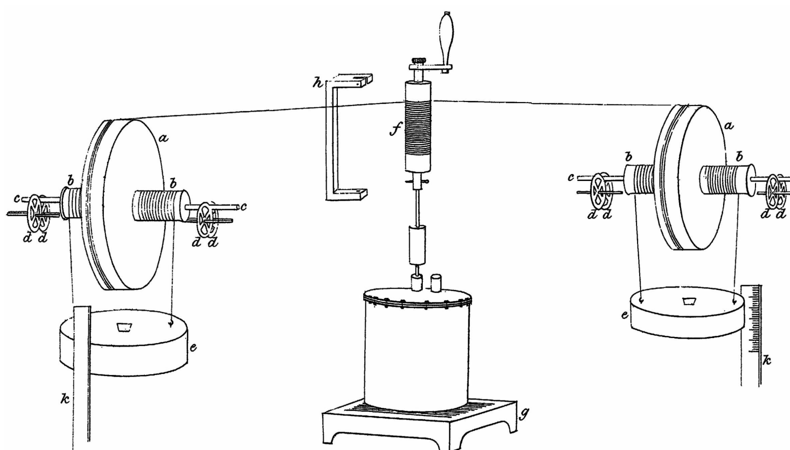


图 12　焦耳的实验设备（来源：*Philosophical Transactions of the Royal Society of London*，vol. 140，p. 64，1850）

不幸的是，焦耳的妻子和儿子在五年之后都离开了人世。焦耳则继续和汤姆森一起工作。实际上，他们共同发现，当气体自由膨胀而不对外做功时，气体的温度会降低，这一点最终催生了冰箱的发明。不幸的是，焦耳对于科学的热情导致其家庭酿酒业的衰败；而幸运的是，他获得了英国文官的养老津贴，这让没有家庭的焦耳得以舒适地度过他的晚年。他最知名的贡献被铭刻在其墓碑上面。功可以用牛顿米来度量，就像我们在前面所做的那样，而 19 世纪的英国物理学家则更喜欢用英尺磅为单位来度量。焦耳所做的工作向我们展示了机械能如何向热能转化。当时人们使用英制热量单位（BTU）来度量热能，一单位 BTU 即是在大气压强下将 1 磅水的温度升高 1 华氏度所需的热量。焦耳墓碑上刻着的数字 772. 55 是为了纪念他于 1878 年进行的一项实验。在实验中，他发现要产生 1BTU 的热量，需要做 772. 55 英尺磅的功。

尽管有时人们将 772. 55 英尺磅每华氏度称为焦耳常数，但与本书提到的其他常数相比，它其实并非是一个真正的基础常数，充其量只是另外一种形式的水的比热。所有物质都有比热，虽然水在地球上异常重要，但我们可以设想，假如某个物种依靠甲烷生存和进化，那么那里的焦耳常数就要由甲烷的比热来替代了。

焦耳常数虽然并非真正的基础常数，但它仍然催生出了热力学第一定律，即能量会从一种形式向另一种形式转化，比如从机械能向热能转化或从动能向势能转化，但能量既不能凭空创造也不会凭空消失。我们再看一下爱因斯坦的过山车例子。假如过山车从最高处开始运行，在初始状态下，全部能量均为势能。过山车在下行过程中会与轨道摩擦产生一定的热量。在最低处，过山车的全部能量就是动能、摩擦产生的热能以及较低的势能三者的总和。而当过山车再次上升，它会继续摩擦生热。不过，这时它无法上升至原先的高度，因为上升至原先高度需要过

山车具有和原先相同的总能量，而其中一些能量已经转化为热量消耗掉了。

热力学第二定律

不同形式的能量之间可以相互转化，但似乎我们的宇宙更加中意热能这种形式。机械能转化为热能相对容易，而且实际上，这种转化往往不请自来，也送不走。机械能转化为热能，往往就意味着能量的损失，而我们对此无能为力。还是以爱因斯坦所举的过山车为例，摩擦生热提升了轨道的温度，但这又有什么益处呢？当然，这并不是说反方向的转化就完全不可能：自从蒸汽机发明以来，人类已经能够将热能转化为机械能。这项技术驱动着当今多数交通工具，通过汽车的内燃机和飞机的喷气发动机，热能被转化为了机械能。但是这种转化十分低效，大量的热能都被浪费掉了。在内燃机中，圆柱形气缸中的气体受热膨胀，驱动活塞，进而带动汽车的传动轴，通过一个巧妙的轴承系统，活塞的前后运动便转化为轮子的转动力。然而在整个过程中，当气体被加热用来驱动活塞时，气缸壁的温度也同时升高，这一点则毫无益处。过高的温度会使气缸变形，因此气缸需要润滑油以减少摩擦。尽管如此，多余的热量仍会传导至汽车的其他部分，因此汽车中需要内置一个降温系统，以防止过高的温度对汽车造成损害。

最初开展热机效率研究的是一位法国物理学家和军事工程师——萨迪·卡诺。人们发现热能存在一个常见而又令人困惑的现象：热机需要燃料才能工作；如果所有物体的温度都相同，那么就没有办法捕捉到热量。在焦耳的实验中，重物下坠使水温升高，这时只有将其传导至温度较低的物体上才能利用其中的热能。在我们的宇宙中，动能和势能相互

转化的效率相对来说是很高的：随着行星接近太阳，根据开普勒定律，其运行速度会加快，其势能便会转化为动能；随着行星远离太阳，其动能便会转化为势能。我们知道，行星几乎沿着相同的轨道运行了数十亿年之久，由此可知这一能量转化效率是十分高的。

另一方面，把一杯热水和冰块混合起来，最终会得到一杯温水。没有人能见到当温水开始结冰时，尚未结冰的水反而温度上升的情况。这一点是热的基本属性。在卡诺的重要作品《对于热的动力的反思》[7] 中，他对此给出了十分简洁的表述："蒸汽机中所产生的动力并不是全部来自所消耗热量，而是来自那些从温度高的物体转移到了温度低的物体的热量。"[8] 尽管卡诺在描述他的发现和成果时使用了热质说，但其思想是独立于热质说的。不论热量是一种像热质的物质还是一种能量形式，热能做功都只能通过将热量从一个温度高的物体转移到一个温度低的物体的方式来实现。

热力学定律最初来自于观察与实验，这一点和机械能守恒定律不同，后者可由牛顿运动定律数学推演得出。上面引用的卡诺观察到的现象，或许是太过司空见惯，竟没人去深究其背后的意义。物体似乎可以自发地冷却下来，但要提高温度则需要热能做功。热力学第二定律的首次阐释来自于德国物理学家鲁道夫·克劳修斯，他提出热量不能自发地从低温度物体向高温度物体流动，这和卡诺的表述不完全一样，但十分接近。或许卡诺也做出过这样的表述，不过我们已经无从得知了，因为卡诺 36 岁便死于霍乱，而为防止疫情传播，他的许多书籍及作品都和他的尸体一起被焚烧了。

后来又出现了许多热力学第二定律的等价表述。其中最为人所知的一个来自于开尔文男爵，他是取热能转化为功的角度（这也是热机的用

处所在）。他对于热力学第二定律的表述是，热机无法完美高效地运作，无法将所有热能全部转化为功。对于热力学第一定律，借用迈克尔・杰克逊的歌词就是“你不可能赢”，我们无法从宇宙中获得免费的能量。而开尔文对于热力学第二定律的表述，借用同样的说法就是“你不可能打平”。宇宙就像一个巨大的热能税务局，当我们试图利用热能做功时，它就会从中收取一定的热能税。

对热力学第二定律的表述中最有趣的一个可能来自于克劳修斯提出的一个数学函数，他称之为熵。我目前和一些非常聪明的孩子在一起，最近有个孩子问我熵是什么。这促使我去寻找一个关于熵的直观定义，而我也找到了一个真正不错的：熵是对于系统中不可用能量的度量方式。举例来说，当热水和冰块的混合体变成温水以后，后者中的不可用能量显然要比前者多，因而后者的熵便大于前者。克劳修斯将系统中的熵定义为 $\Delta Q/T$ 的总和，其中 T 是物体的温度、ΔQ 代表该物体获得或流失的热量——获得热量时为正，流失热量时为负。

例如，想象一个系统中含有两个物体，其中一个温度为 100 度，另一个为 200 度。假设我们计算出系统的熵，并让一个单位的热量进行转移，从 200 度的物体传递 1 卡路里的热量给 100 度的物体。这时系统熵的变化为$\frac{+1}{100}$（100 度物体吸收热量）$-\frac{1}{200}$（200 度物体流失热量），净变化为$\frac{+1}{100}-\frac{1}{200}=\frac{1}{200}>0$，即整个系统的熵增加了。由于热量总是从温度高的物体流向温度低的物体，因此这个例子便代表了普遍的情况，即熵总是在增加。

这便引发了一个宇宙最终“热寂”的概念。当所有热量传递都已经完成，一切物体均有相同温度时，还会发生什么呢？热力学给出的答案

非常简单：不会，什么也不会发生了。熵已经达到了最大值，无法再增加了。在热寂（事实上是真正的冷寂）的情况下，熵达到了最大值，宇宙中任何额外的功都不会产生了。

到此，还有一个重要的问题有待回答：为何热量总是从温度高的物体流向温度低的物体？

路德维希·波兹曼

对以上问题的解答来自于最吸引我的一位科学家。写作像这样一本书的乐趣之一就是有机会深入了解相关人物和发现。在阅读有关路德维希·波兹曼的材料时，我被深深打动了，他拥有真正完满的人生，不论是作为一位科学家，还是作为一个人而言，都是如此。

我喜欢有幽默感的人，而波兹曼的幽默感是众所周知的，至少在他的朋友和熟人圈子里是如此。那是一种如今罕见的温和、自嘲式的幽默感。在描述他参加的一场豪华晚宴时，波兹曼说道："在西北站的餐馆里，我享用了烤乳猪、泡菜和土豆，并心满意足地喝了几杯啤酒。我对于数字的记性在其他情况下都还相当可靠，但对于啤酒杯数我总是记不清楚。"[9]从各方面的材料来看，波兹曼有一桩幸福的婚姻，还有三个可爱的女儿。他会为女儿举办舞会（要知道，这还是在19 世纪），并在舞会上亲自弹奏钢琴。他经常都是派对上的核心人物。一位同事这样评价道："他十分擅长与人交流，非常机智、聪明，随时有好玩的主意，所以在每次聚会上，他很快就成为全场的焦点，主导着各种话题。"[10]

很少有一流的科学家能同时成为一流的教师。我有幸认识一些顶

尖的数学家，但其中只有少数几个同时是很好的老师，很多人的讲课是一塌糊涂。波兹曼却在这两个领域中均名列前茅。莉泽·迈特纳就是他的学生，迈特纳日后对于定义 20 世纪的一项划时代的实验——核裂变的发现——发挥了关键作用。迈特纳上了四年波兹曼的课，从 1902 年到 1905 年。对此她写道："他的课是我听过最精彩、最令人兴奋的课……他总是对他所讲述的东西充满热情，好像每节课都为我们打开了一扇通往美丽新世界的大门。"作为一名老师，我认为这就是最高的褒奖了。

在写作这本书以前，我对波兹曼的了解仅限于他的科学发现以及他的死亡。波兹曼身患抑郁症，这从前文的描述中读者恐怕很难想象得到，而他最终的结局是在里雅斯特附近度假时上吊自杀。我最早知道波兹曼及其死因的时候，正值我选修一门诗歌课程。在课上，我读到一首爱德华·阿灵顿·罗宾逊所写的诗《理查德·科里》。诗中的虚构人物理查德·科里是一个贫穷乡镇里的有钱人，诗是以镇上一个穷人的口吻叙述的。它的最后一段深深震撼了我，刻骨铭心直至今日，这或许是因为刚好当时我在研读波兹曼的作品，了解到他的死因。

> 所以我们努力劳作，期盼出人头地，
> 不知肉味，三餐只有难吃的粗粮；
> 而理察德·科里，在一个静谧的夏夜，
> 回到家里，举枪饮弹了结了自己。[12]

这里何其可悲的事啊，像华莱士·卡罗瑟斯、路德维希·波兹曼这样的天才，还有其他众多受抑郁症困扰的人们，最终由于判断失常，无法控制情绪，而万念俱灰，决定结束自己的生命。对于关心他们的人

们，这会是个多大的损失啊！而对于我们而言，他们原本可能作出的重要发现，也就随之消失了。

统计力学

波兹曼当时是原子论的坚定支持者。从 21 世纪的观点来看，这大概就像是坚定支持哥白尼的太阳中心说，似乎理所应当。然而在波兹曼的时代，原子论，进而波及到波兹曼本人，都是受到当时一些著名物理学家的持续攻击。不停地为自己坚持的东西辩护可能也是导致波兹曼身患抑郁症的原因之一吧。

如果你和波兹曼一样，也相信原子论，那么你也会意识到阿伏伽德罗数是个多么庞大的数字，因而试图通过对一升理想气体（包含大约 10^{23} 个分子，即 10^{23} 个物体）的构成进行描述是完全不可能做到的。甚至在一团混乱中追踪单一个分子的轨迹都是无法做到的。波兹曼是统计力学最初的主要贡献者之一。统计力学，顾名思义，结合了统计学以及有关气体分子如何运动的力学知识。

举个例子，我们在描述美国的经济情况时，不可能针对每一个单独个体进行描述，这样做的话，整个数据量就太庞大了。但我们可以考察所有重要经济参数的分布状况，比如年收入在 5 万美元到 7.5 万美元之间的民众占总人口的百分比，诸如此类。虽然这样的描述并不完美，不过对很多用途来说已经足够了。讨论一瓶气体时也是一样，对于很多实际用途，一般只要知道分子的位置和速度分布即可。比如，知道速度在 30～35 厘米每秒的分子占全部分子数量的百分比，就可以大体描述这瓶气体的状态了。这就是统计力学的分析方式，在 19 世纪下半叶，人们利用这种方式记录下众多伟大的发现。波兹曼常数便是其中之一，该常

数将个体微粒的能量与物体的整体温度联系起来。

波兹曼常数

波兹曼在该常数的发现上并未耗费太多精力，这个符号为 k 的常数只是由理想气体常数 R 简单除以阿伏伽德罗数而得出。尽管如此，波兹曼常数 k 还是出现在了一些非常重要的等式里面，涉及气体动理论、统计力学、热力学等领域。而通过该常数，我们也得以用数学方式解释如下事实：尽管我们能够谈论一个系统的整体特征，比如一瓶气体的温度，但并非其中的每一个分子都具有相同的能量。一瓶气体中的分子之间会发生随机的碰撞，这些碰撞会导致其中一些分子的运行速度高于所有分子的平均速度，而另一些分子的运行速度则会低于平均速度。而理想气体中一个单原子分子所具备的平均平动动能可以通过 $\frac{3}{2}kT$ 表示出来，其中 T 是以开尔文为单位的温度。由于质量为 m、速度为 v 的分子的平动动能为 $\frac{1}{2}mv^2$，假定分子的转动没有消耗任何能量，我们便可以得出 $\frac{3}{2}kT=\frac{1}{2}mv^2$。由此可知，温度和分子速率的平方成正比。

根据以上公式求 T 值，可得出 $T=\frac{1}{3}mv^2/k$。绝对零度是 $v=0$ 时的特例。而若设定 $v=c$，情况则更加有趣，T 将成为一切物体所能达到的最高温度。让我们以质量最重的惰性气体氡为例。此类气体之所以被称为惰性气体（noble gases，意为贵族气体）是因为它们很少会和其他元素发生化学反应，就像贵族的成员很少接触底层民众一样。1 摩尔氡的质量约为 222 克，所以一个氡原子的质量为 $222/(6\times10^{23})=3.7\times10^{-25}$

千克。而光速大约为 3×10^{8} 米每秒，因此如果有可能让一个氢原子以十分接近光速的速度运行，那么其温度将达到 $\frac{1}{3}\times(3.7\times10^{-25})\times(3\times10^{8})^{2}/(1.38\times10^{-23})$ 开尔文，即 8×10^{14} 开尔文。这可真够热的。但至少地狱不可能有这么热，因为至今还没有任何一位神学家声称在地狱中存在以接近光速运行的氢原子。这对于我们这些生活够不上典范的人们来说，多少是种安慰吧。

回到理想气体的全体分子，波兹曼计算出理想气体中能量为 E 的分子数量比例是与 $e^{-E/kT}$ 成正比的。不同的 T 值会产生不同的曲线，如果冒一点将问题过于简单化的风险，可以说曲线都近似于钟形（图 13）。当 T 值低时，曲线的峰值会高而狭窄；而随着 T 值逐渐增加，曲线会变

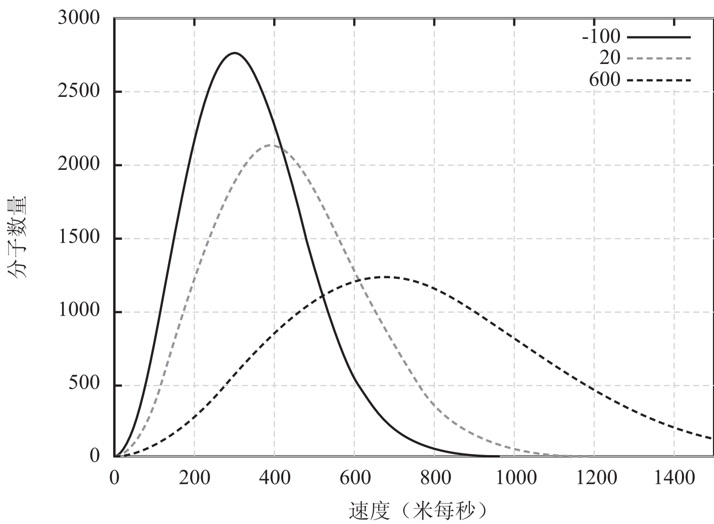


图 13　分别在 –100 摄氏度、20 摄氏度和 600 摄氏度下，10^{6} 个氧分子的麦克斯韦-波兹曼统计。横轴为速度（米每秒），竖轴为一定速度下的分子数量（制作者：Superborsuk）

得越来越扁平。这一点并不意外，因为当温度更高时，分子的运行速度就更快。让我们以开车为例，如果在一条限速 60 千米每小时的马路上，多数汽车都会以非常接近 60 千米每小时的速度行驶，但在一条限速 140 千米每小时的马路上，小老太太们（可不是《来自帕萨迪纳的小老太太》歌中那位脚不离油门的老太太）一般都会以大概 80 千米每小时的速度开车，而经常开车接送孩子的母亲则会开到 100 千米每小时，青年人或跑车司机则会以超出限速的速度驾驶。

波兹曼常数的精华部分是一个熵公式，该公式也刻在了波兹曼的墓碑上面。波兹曼常数的单位和熵的单位一样。为理解波兹曼熵公式，我们来看一个非常简单的例子，假设一份理想气体中只含有两个分子——分子 A 和分子 B。假设分子 A 以 50 厘米每秒的速度运行，而分子 B 以 100 厘米每秒的速度运行。我们测量气体的温度，测得一个特定值，以 T 来代表。如果分子 A 以 100 厘米每秒的速度运行，分子 B 以 50 厘米每秒的速度运行，再次测量气体温度，我们会得出一个相同的值 T。这时 T 值便是该系统的宏观状态，而分子 A 和分子 B 的速度安排（50 厘米每秒和 100 厘米每秒）则是对应于宏观状态 T 的微观状态。显而易见，当我们取 1 摩尔的理想气体时，会有多得多的微观状态来对应一个相同的宏观状态。气体温度越高，宏观状态所对应的微观状态就越多。再以开车为例，有 100 辆车在马路上行驶，在平均时速为 80 千米每小时的情况下，这些汽车的运行状态会比平均时速为 20 千米每小时的情况下更加多种多样。

以上关系可以表述为公式 $S = k\ln W$，其中 S 代表熵、k 为波兹曼常数、W 是熵为 S 时的宏观状态所对应的微观状态数量。微观状态—宏观状态的图景能最终解释为何热量总是从温度高处向温度低处流动。实际上，这就是一个简单的概率问题。任何一个微观状态和其他微观状态没

什么两样，但温水的宏观状态所对应的微观状态数量则会比冰块加热水的混合体所对应的多得多。更加有趣的是，这也为温水重新变为热水加冰的混合体打开了一扇门。只是这实在是太不可能，我们至今是闻所未闻，而且终宇宙的一生也不可能发生这样的事情。

正如前文所述，波兹曼常数是两个基础常数的比值，这两个常数在前面都已经介绍过了。这看上去似乎轻而易举，不过这并非科学史上唯一一个仅凭对已知元素的简单重组就作出重大发现使得发现者名垂青史的例子。我第一次遇到此类情况是法国数学家和科学家让勒朗・达朗贝尔将牛顿第二定律的等式 $F=ma$ 变换为 $F-ma=0$，后者就被重新命名为最小虚功的达朗贝尔原理。对此我既感到震惊，同时也激发起很大的斗志，似乎找到了一条可以通往不朽的道路：只要简单地将万有引力常数 G 除以光速 c，斯特恩常数便由此诞生了。然而将它作为我的墓志铭的美梦很快就破灭了，我认识到仅仅简单地进行重组还不够，必须要证明重组是有重要意义的。因此，我还是决定把它放到墓志铭候选清单的最后面。

注释

[1] 这个问题终于出现了。在我们日常使用的英制单位中，磅是用来表示重量，而非质量的。两者的区别在于，质量不会改变，而重量则会；我们的质量在地球上和在月球上都是一样的，但我们的重量在月球上则会大大降低，因为月球重力对质量的作用力要远小于地球重力对质量的作用力。这其实就是第 1 章里我们所遇到的小 g 的概念，小 g 是一个局部常数，大 G 则是一个普适常数。

话说回来，英制中的质量单位实际上是斯勒格（slug）。我不知道这一名称源自何处，或许和英文单词 sluggish（迟缓）有关吧。由于我们习惯使用英制单位中的磅，通常我们都不会想到两者其实并不是一回事。通过公式 $F=mg$ 以及地球表面的 g 大约为

32 英尺每二次方秒的事实，我们可以得出一个重 32 磅的物体在地球表面的质量为 1 斯勒格。

而其中更混乱的一点是人们常常将 1 千克换算为 2.2 磅。我很清楚这种错误源自何处。我们知道，1 千克指的是 1 升水的质量；升是体积单位，加仑也是体积单位。1 加仑等于 3.785 升的水，而 1 加仑水的重量大约为 8.35 磅；用 8.35 除以 3.785 便可得到 2.2，因此 1 升水的重量便等于 2.2 磅。

在进行涉及力的运算时，使用英制单位是比较简便的，因为重力作用已经写进了磅的定义里；磅实际上是一个重量单位，而非质量单位。但运用公制单位进行运算时，力的单位为牛顿，1 牛顿是指以 1 米每二次方秒的加速度来为 1 千克的质量加速所用的力。因此，当在公制单位中计算物体的重量时，以千克为单位的质量必须乘以公制单位中小 g 的值（大约为 9.8 米每二次方秒）才能得到其以牛顿为单位的重量。

如此混乱的情况竟然没有造成太多运算上的灾难，我实在不能不为此感到惊讶。

[2] A. Einstein, *The Evolution of Physics* (New York: Simon and Schuster, 1961), 44-47。

[3] 可参见 http://www.chemteam.info/Chem-History/Rumford-1798.html（2011 年 1 月 17 日有效）。这是伦福德论文的原文，非常容易读。

[4] 同上。

[5] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule（2011 年 1 月 17 日有效）。

[6] 同上。

[7] 可参见 http://www.archive.org/stream/reflectionsonmot00carnrich#page/n7/mode/2up（2011 年 1 月 17 日有效）。这是卡诺论文的翻译版，还附有一张卡诺的肖像。

[8] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_Léonard_Sadi_ Carnot（2011 年 1 月 17 日有效）。

[9] E. Broda, *Ludwig Boltzmann: Man, Physicist, Philosopher* (Woodbridge, CT: OxBow, 1983), 25。这本有趣的小书是我最喜欢的书之一。另外，还有一点也非常令我好奇，这本小书由一家很小的出版社出版，而这家出版社也刚好重印了另外一本对我帮助极大的图书，不过是针对另外一个领域的。那本书叫《伤背之书》（*The Bad Back Book*），作者为杰里·韦恩，讲的是一位背部受各种伤痛困扰的笑星的真实故事。在印度旅行时，他遇到一位瑜伽练习者，学得一套锻炼方法，结果治好了他之前怎么都治不好的背病。我按照书里的方法锻炼，直到现在。

［10］同上，第 19 页。

［11］同上，第 11 页。

［12］可参见 http://www. poemhunter. com/poem/richard-cory/。我一直很喜欢诗歌，不过相对来说，更喜欢有节奏有韵律的诗歌。爱德华·阿灵顿·罗宾逊并未得到他应得的尊重，今天的人们已经不认识他了。不过西蒙和加芬克尔乐队（Simon & Garfunkel）以这首诗为题材创作了一首歌，绝对值得大家花三分钟时间听一听。可参见 http://www. youtube. com/watch? v = euuCiSY0qYs（两个链接在 2011 年 1 月 18 日均有效）。

［13］可参见 http://www. elyrics. net/read/j/jan-&-dean-lyrics/little-old-lady-from-pasadena-lyrics. html（2011 年 1 月 18 日有效）。



第 8 章

普朗克常数

马克斯·普朗克 16 岁就上了大学，鉴于他最终所取得的成就，这一点并不那么令人吃惊。我的班上很少有 16 岁的大学生，不过当我难得遇上一个时，我一般可以期待他们会成为尖子生，甚至有机会跻身伟大的行列。在普朗克就读于慕尼黑的马克西米利安文理中学的最后三年里，他在 23 人的班级中排名第八，在 21 人的班级中排名第三，在 19 人的班级中排名第四。[1]他并非尖子生，却是一个备受喜爱的学生，“他是老师和同学们的最爱”。[2]我无法推测为何他在同学中间也受欢迎，但据我自己的经验，大概可以想见为何老师会喜欢他。诚然，每个老师都想有一个特别聪明的学生，不过更令老师高兴的是看到一位愿意付出百分之一百一十努力的好学生。可问题是，作为一名优秀但不拔尖的学生，他如何能够做出之后的成就，彻底改变物理学的面貌呢？

普朗克对物理学很感兴趣，于是他找到慕尼黑大学的菲利普·冯·祖利进行了一些咨询。主要从事实验物理学研究的祖利对于理论物理学的前景并不看好，他告诉普朗克：“在这一领域，几乎该发现的都已经被发现了，剩下的工作不过是填补一些不太重要的细节。”[3]（我完全无法想象我会对学生或未来的学生讲这样的话，这可能是因为数学涵盖的课题非常之广，同时，无穷本身就是数学中非常重要的研究内容。虽然有的时期，比如现在，整个行业面临着僧多粥少的问题，但我很幸运，刚进入该行业时情况正好相反。）普朗克则告诉祖利，他并没有想去发现新的事物，而只是想要了解该领域中已知的内容。

然而，不管是祖利，还是普朗克，他们对未来的设想全都错得离谱。从那时到现在已经过去了一个多世纪，除了祖利所说的漏洞没有被填补起来以外，更多未知的洞穴也有待探索。无疑，人类尚未探明的窟窿比每年全球生产的瑞士奶酪上的窟窿还要多。尽管普朗克可能最初并未想去发现新的事物，但他还是做出了新发现，催生了物理学自牛顿以

来一场最重大的变革。

普朗克的大学也念得很快，他在相对稚嫩的 20 岁便开始撰写博士论文，并在四个月后顺利完成，不过他的研究仍然没能给物理学界的前辈留下深刻印象。他关于热力学第二定律的博士论文，几乎没能对德国物理学界的顶尖人物产生任何影响。伟大的古斯塔夫・基尔霍夫（发现光谱的人，并对电路理论有重大贡献）认为论文观点是错误的。而另两位著名的科学家赫尔曼・冯・亥姆霍兹（阐明能量守恒原理）和鲁道夫・克劳修斯（提出熵的概念）甚至没有兴趣去阅读这篇论文。在之后的五年里，普朗克没有得到一份学术职位。直到 1885 年，他父亲在自己很有影响力的基尔大学为普朗克谋得一份类似于助理教授的职位。之后不久，普朗克便在哥廷根大学哲学系举办的有关能量本质的征文中获得了第二名的成绩。征文并没有评出第一名，显然评审者认为普朗克的论文虽然优于其他参赛论文，但也不是十分出色。不过普朗克却因此得到了一个机会，虽然哥廷根大学并未被他的论文打动，柏林大学则非常欣赏他的论文，并邀请他前去教书。职位同样是助理教授，但学校更为知名。具有讽刺意味的是，这个职位原先是由古斯塔夫・基尔霍夫担任，也就是那位认为普朗克的博士论文理论有问题的教授。

几年之后，普朗克开始逐渐受到人们的肯定。他的博士论文也被视为一篇非常重要的论文，人们经常会来借阅这篇论文，以至于最后整篇论文几乎都要散架了（那还不是个能够轻松复制粘贴的时代）。到了 1892 年，普朗克已经成为柏林大学的终身教授。正是在这一阶段，普朗克开始对将他送至不朽殿堂的问题产生了兴趣。

光和热

如果你有一台电炉，你肯定注意过这样的现象：当你打开电炉时，电炉丝的颜色会从暗红色变为亮橘色。至少我那台是这样的，如果你的电炉发热性能更好，其颜色可能会慢慢变为一种泛黄的白色，然后再变为一种泛蓝的白色。当然，前提是你的电炉十分特殊。当金属变为黄白色时，其温度大概是 1600 开尔文（约 1300 摄氏度）。而铁质电炉丝达到此温度时就会熔化，炉子本身也会熔化。因此厂商会采取措施防止此种情况发生。电炉持续开太长时间容易导致恶果（每次出门时，我都会检查好几次电炉是否关掉，这也是科技时代所带来的副作用之一），当然这不只是电炉丝熔化那么简单。

我们现在都了解颜色和温度之间的关系，但在当年，对此的研究工作却是十分不易。基尔霍夫作为最早开展这项研究的人，成功发现一些非常重要的现象：呈现的颜色与受热的材料或其配置方式无关。不论是我的电炉所配置的铁圈，还是爱迪生在其首只成功发明的电灯中所用的钨丝，它们受热时的颜色变化都是一样的，对颜色变化起作用的只有温度。

色彩实际上就是物体所辐射出的电磁波波长的视觉反映。最长的可见光波长呈现出的就是暗红色，红外线波长的更长，只是人眼看不见。我们不会将自己视为辐射体，但实际上我们的确是：人类的体温大概在 310 开尔文（约 37 摄氏度）左右，我们身体所发射的大部分热量都是红外线，因而通过红外线感应器可以在黑屋子里探测到人的存在。然而，一个热体所辐射出的所有能量并非只呈现为某种颜色。我们所看到的颜色只是热体辐射出的主要波长所对应的颜色，实际上每一个物体，

从液氦到最热的恒星，它们都辐射出不同波长的能量。

物理学家在探讨温度与光的关系时，提出了黑体的概念。黑体处于热平衡状态，也就是说，它的温度是稳定的，它能够完美吸收和放射出电磁辐射。空腔辐射体是经典的黑体，它是一个中空的物体，只开有一个很小的口；由于开口很小，能够放射出来的辐射也很少，所以其辐射大多都会在空腔内来回反射，从而使空腔内达到热平衡。19 世纪物理学的一个关键问题就是要从理论和实验上确定黑体辐射的不同波长能量的分布曲线。物理学家预测，在不同温度之下，会有不同的强度曲线。

在当时，这些曲线不只是具有理论研究意义。电灯显然预示着一种未来的方向，而电灯便是通过加热来制造光亮。了解这些曲线能够帮助工程师设计出耗热尽可能少的电灯。实际上，西门子家族曾经为柏林的一家机构提供资金，帮助其将理论科学与产业应用结合起来。[4] 而这家机构中的一位科学家威廉·维恩就在这项研究中取得了重要的进展。

要理解维恩的成果，我们需要对与波相关的基本术语有一定的了解。我一直喜欢临水而居，如今位于南加里福尼亚的住所就是毗邻太平洋。站在海岸看着波浪一层层涌向沙滩，或者在水不冷的时候下水游泳，都是令人十分惬意的事情。波浪的特征包括其起伏高度（即振幅）以及一定时间内冲向岸边的次数（即频率）。波的频率由希腊字母 υ（读做“纽”）表示，而光的颜色取决于其频率，即光波每秒振动的次数，单位为赫兹。

电磁波的频率范围极广。广播和电视信号的频率相对较低，大约每秒振动数千万或数亿次。而由强烈爆炸引发的强大的伽马射线频率则非常之高，每秒钟的振动次数可高达 10^{18} 次。电磁波谱中人眼可见的只是

其完整光谱中很小的一部分：红光的振动次数大约在每秒 4×10^{14} 次这个量级，蓝光的振动次数则大约为 7.5×10^{14} 次。红外线的频率比红光略低，而紫外线的频率则比蓝光略高。[5]

维恩在波谱的蓝光部分展开实验。他发现，如果用 T 代表绝对温度、υ 代表光的频率，那么当黑体被加热到 T，其辐射出的频率为 υ 的光的强度 $I(\upsilon, T)$ 大约为 $A\upsilon^3 e^{-B\upsilon/T}$，其中 A 和 B 为两个正的常数，其数值是维恩通过实验得出的。该成果对他的业界资助者来说已经足够了，他们只要有可运用的数值便满足了。但对于理论学者来说，这还不够，他们必须要了解 A 和 B 为何会得出这样的值。比如，如果一个理论学者看到某个表达式中存在数字 300 000（或接近的数字），他定会产生疑问，为何光速会出现在这个表达式中，然后就会试图做出一个理论推导来解释这一问题。维恩的这一公式被称为维恩辐射定律，它是个很有用的公式，但并没有为辐射理论带来太多革新。

瑞利-金斯定律和紫外灾难

维恩开展此项工作的时候，在北海的另一边，英国人瑞利男爵和詹姆斯·金斯（日后成为詹姆斯·金斯爵士）两人也在同时试图推出维恩通过实验所得出的强度曲线。

他们的出发点是能量均分概念：在一个像黑体一样处于热平衡的系统中，系统中可用的全部能量会被平均分给各种可能的能量形式。比如，一个气体分子会同时具有移动时的平移动能以及旋转时的旋转动能。这一概念日后在统计力学中结出了累累硕果[6]，包括麦克斯韦-波兹曼分布。因此，瑞利和金斯在对热辐射的分析之中采用这一假说也是十分合理的。他们理论分析的成果同样也是一个关于 $I(\upsilon, T)$ 的表达

式，但与维恩通过实验得出的公式大不相同。在瑞利-金斯定律中，$I(v, T) = (2k/c^2)v^2T$，其中 k 为波兹曼常数、c 为光速。这一公式相较于维恩公式具有显著的优势：首先，公式中的常数都是已知的物理学常数，而非实验得出的数据；其次，该公式相比维恩的公式更符合实验测得的红光强度曲线。

不过，它也有一个重大的劣势，那就是它是明显错误的。由于 k 和 c 都是固定的，而当黑体的温度 T 也是固定的时候，其强度 $I(v, T)$ 便和频率 v 的平方成正比。这也就意味着，当频率越来越高时，光的强度也会无限增大（图 14）。而这一点明显是违背事实的，所有现实中的强度曲线都会在一定频率时抵达峰值，然后便随着频率的继续增高而下降。一块红热的铁条是红色的，它不会同时呈现出频率更高的蓝色和紫

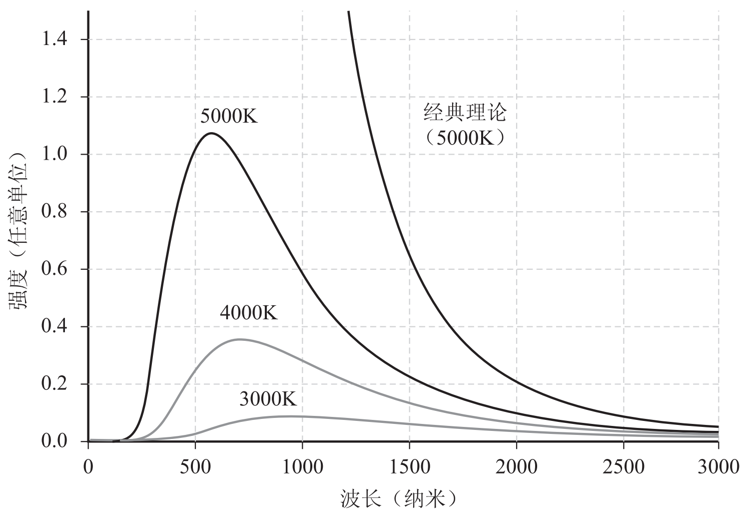


图 14　当黑体的温度一定（如 5000 开尔文）时，根据瑞利-金斯定律（图中“经典理论”所示的曲线），随着频率越来越高（即波长越来越短），辐射强度会无限增大，即所谓“紫外灾难”（制作者：Darth Kule）

色。物理学家保罗·埃伦费斯特为这一结果起了一个美妙的名字：紫外灾难。（如果我有能力组建一支车库摇滚乐队的话，我会毫不犹豫地给它起名紫外灾难。）紫外灾难指的是，当光的频率朝着紫外线的方向不断增高时，瑞利-金斯定律不但与实验得到的数据不符，而且其预测也错得离谱。

这就是 19、20 世纪之交时的状况。历史已经为马克斯·普朗克的物理学变革准备好了舞台。

进入量子时代

自从基尔霍夫证明了黑体的材料和形状都不相关后，理论学者已经开始自由选取任何他们需要的模型了。普朗克所选择的模型由带电的简单和谐振子组成，金属弹簧就是一个简单和谐振子的例子。分子的振动情况确实有点像弹簧，所以这例子并非牵强附会。普朗克最初走的是一条与瑞利和金斯相同的路，他假设谐振子辐射出的能量是连续的，能取到任何可度量的值。他也因此陷入到同样的紫外灾难之中。

后来某一天，他作了一个不同的假设。按照他后来告诉儿子的说法，这个假设的革命性与牛顿或麦克斯韦的伟大假设不相上下。[7] 他之前设想谐振子能够辐射出任意强度的能量，而此时普朗克假设存在一个数值 h，当一个谐振子辐射频率为 v 的能量时，其能量强度必须是 hv 的整数倍数，如 hv、$2hv$、$3hv$ 等。

这一假设有一个直接的推论，即它为黑体辐射的频率设定一个上限，从而避免了紫外灾难。由于一个黑体的总体能量必定是有限的，假定为 E，其辐射的强度也必定存在一个上限。假定将黑体中的所有能量

置入一个单独的谐振子中（尽管这不太可能），那么其辐射频率 υ 的上限可以由 $E=h\upsilon$ 得出，即 $\upsilon=E/h$。如果该谐振子辐射的能量为 $h\upsilon$ 的倍数，比如 $2h\upsilon$，那么其辐射频率最高便为 $E/2h$。如果黑体中还有其他谐振子也在辐射能量，那么分配给每个谐振子的能量则会减少。以上例子便说明紫外灾难是不可能出现的，因为频率存在上限，我们无法通过任意提高频率来制造紫外灾难。虽然普朗克所作的假设是基于特殊情况，不过通过这一假设，他进而得出了以下这个辐射强度公式：$I(\upsilon, T)=(2h\upsilon^3/c^2)/(e^{h\upsilon/kT}-1)$。这个公式至少有三个有趣的特点。首先，它不会产生任意高值的强度，频率的幂函数（$h\upsilon^3$）会除以其指数函数（$e^{h\upsilon/kT}$）。由于指数函数变大的速度要快于幂函数，这也就意味着普朗克函数在一定温度 T 下，都存在一个辐射强度的上限。不妨看一下一个非常类似于普朗克公式的函数 $f(x)=x^3/2^x$，依次令 $x=1, 2, 3, \cdots$，我们会依次得到 $f(x)=\frac{1}{2}$，2，$3\frac{3}{8}$，4，$3\frac{29}{32}$，之后 f 的值便会开始快速趋向于 0。

其次，如果 $h\upsilon$ 比 kT 大得多，那么 $e^{h\upsilon/kT}$ 的值就会非常大，而后面的 -1 则几乎起不到什么作用，因此在这些频率下，公式可以变换为 $I(\upsilon, T)=(2h\upsilon^3/c^2)/e^{h\upsilon/kT}$。普朗克马上意识到这与维恩公式 $I(\upsilon, T)=A\upsilon^3e^{-B\upsilon/T}$ 形式相同（因为 $1/x$ 和 x^{-1} 是一样的）。因此，维恩公式中通过实验得出的常数 A 和常数 B 其实都是具有物理学意义的常数：$A=2h/c^2$，$B=h/k$。

为了理解普朗克公式中的第三个有趣之处，我们需要借用微积分中的一个结论。这还要从芝诺悖论说起，假设一只弓箭在射向箭靶时，先飞行一半的距离，然后飞行剩下一半的距离，依此类推，那么弓箭是否可能射中箭靶呢？这看上去似乎永远也不可能，因为弓箭只是飞行剩下一半的距离。然而，假设我们将距离设为 1，在芝诺悖论中每次弓箭运

行的距离将是 1/2，1/4，1/8，…。那么所经过距离的总和便为 1/2 + 1/4 + 1/8 + …。

要解决芝诺悖论，我们可以延伸来看一个更一般的例子，求等比级数 $r + r^2 + r^3 + \cdots$的和，其中 r 是一个介于 0 和 1 之间的数字。

不妨用 S 来代表级数的和，$S = r + r^2 + r^3 + \cdots$。在等式两边同时乘以 r，可得到 $rS = r^2 + r^3 + r^4 + \cdots$。如果我们用 S 减去 rS，得到 $S - rS = r$。等式左边合并因子后可得到$(1 - r)S = r$。于是，$S = r/(1 - r)$。在芝诺悖论中，$r = 1/2$，到此我们可以松一口气了，因为 $S = \frac{1}{2}/(1 - \frac{1}{2}) = 1$。如此看来，弓箭的确会射到箭靶。

在 18 世纪，微积分技术，特别英国数学家布鲁克·泰勒[8]所得出的那些公式，主要被用来将一些函数表达成无穷级数的和（即函数的幂级数展开式）。上述例子可以被视为是函数 $f(r) = r/(1 - r)$的幂级数展开式。能够进行展开的最基本的函数之一是指数函数 $f(r) = e^r$，其展开式如下：

$$e^r = 1 + r/1 + r^2/(1 \times 2) + r^3/(1 \times 2 \times 3) + r^4/(1 \times 2 \times 3 \times 4) + \cdots$$

当 r 的数值特别小时，等式右边头两项 $1 + r$ 的数值就非常接近 e^r 的准确值。普朗克当然对此十分清楚，当 $h\upsilon$ 比 kT 小很多的时候，其强度函数的分母部分 $e^{h\upsilon/kT} - 1$ 便会十分接近于$(1 + h\upsilon/kT) - 1 = h\upsilon/kT$。这样普朗克可以变换公式得到 $I(\upsilon, T) \approx (2h\upsilon^3/c^2) \times kT/\upsilon h = (2k/c^2)\upsilon^2 T$，也就是瑞利-金斯定律！

够神奇吧，就像从帽子里掏出兔子来！通过假设谐振子只能辐射出 $h\upsilon$ 整数倍的能量，普朗克得出一个可以避免紫外灾难的公式。同时，该

公式还能够进一步推导出瑞利-金斯定律和维恩辐射定律，更别说它还解释了维恩辐射定律中神秘常数的物理学意义。

更多兔子还在后面呢！毕竟，你从兔子那还能期望什么呢？（或许我父母能回答这一问题：1935 年，我父母前往百慕大群岛度蜜月，有一位淘气的朋友在他们的船舱中准备了一对兔子。等他们到达百慕大时，这对兔子已经生了近十只小兔出来。）基尔霍夫已经证明，所有处于热平衡状态的物体，其发射辐射与吸收辐射之比都是相同的一个常数，与物体的材料和形状都无关。普朗克利用带电的简单和谐振子来制造辐射，因此当波兹曼常数出现在他的辐射定律中时，这说明在电磁学与尚未被完全接受的原子论之间可能暗含着一种关联。

当普朗克对他的儿子表示，他的设想可能与牛顿或麦克斯韦的伟大发现同等重要时，他的确有预见性。诺贝尔奖委员会在 1907 年和 1908 年都将普朗克列为最终的候选人之一。实际上，他也差一点就拿到了 1908 年的诺贝尔奖，不过不是由于他的量子假说，而是由于他的计算结果证实了原子论。[9] 一直到 1918 年，他才最终获得诺贝尔奖，此次的获奖理由是“其通过发现量子而为推动物理学进步所作出的贡献”。[10]

物理学界着实花了一些时间才真正认识到，量子的概念才是普朗克理论中真正的精华所在。长期以来，量子都只被视为一个数学技巧而已，即便它既避免了紫外灾难，又能够在特定情形下推导出瑞利-金斯定律和维恩辐射定律。数学是物理学的语言，但有时候，数学符号与现实世界之间的关联并非那么显而易见。在理想的情况下，人们期望根据对现实世界的观察和假设而推导得出数学理论，进而得出符合现实的公式，而不是根据与现实世界没有明显关联的假说而推导得出数学理论和公式。

到底什么是 *h*

常数的单位通常可通过包含该常数的一个等式来确定。不妨以牛顿的万有引力公式 $F = GmM/r^2$ 为例，其中 G 的值必须以质量单位乘以距离单位的立方再除以时间单位的平方来表达。这是因为力的单位为千克米每二次方秒，而表达式 mM/r^2 的单位为二次方千克每二次方米。为使两边的单位及其指数相等，G 的单位必须是千克三次方米每二次方秒。

相同的逻辑也适用于 h，在等式 $E = h\upsilon$ 中，h 的单位应是能量单位乘以时间单位。而计算出的 h 值，采用当年流行的单位制，其结果为 6.62×10^{-27} 尔格秒。其中尔格为能量单位（合 1×10^{-7} 焦耳），我的一位物理学教授曾将之大致描述为一只蚂蚁跺一条腿所需的能量。我不知道这种描述的准确性有多高，但它至少让我们了解到，尔格是一种非常小的能量单位。因此，6.62×10^{-27} 尔格更是非常非常小的一点能量。1 尔格秒即是在 1 秒钟内消耗 1 尔格的能量。蚂蚁很可能不跺腿，即使它们跺的话，所耗费的时间也远远少于一秒钟，因此虽然对教授心怀歉意，我还是要换个说法。我们都见过蚂蚁搬运糖粒或相似物体的情景，不妨假设一只蚂蚁推动一颗糖粒 1 秒钟所消耗的能量为 1 尔格秒。我们知道，可见光的频率平均为 5×10^{14} 赫兹。因此，要辐射出可见光所需的最小能量约为 $h\upsilon = 6.55 \times 10^{-27} \times 5 \times 10^{14} = 3.28 \times 10^{-12}$ 尔格。也就是说，我们需要三千亿个此类能量才能累积出一只蚂蚁跺一条腿所需的 1 尔格能量。而释放一个光子所需的时间大概为十分之一皮秒，即 10^{-13} 秒。这就意味着，我们需要 3×10^{24} 个此类过程才能相当于一只蚂蚁推动一颗糖粒 1 秒钟所消耗的能量。

现实世界中的量子极其微小。红光的频率大约为 4×10^{14} 赫兹，

$h\nu = 6.62 \times 10^{-27} \times 4 \times 10^{14} \approx 2.65 \times 10^{-12}$。因此，红光最小的能量变化量大约为四千亿分之一尔格。如果变化量大到一定程度，它的影响就会在现实世界中显现出来。比如，大部分人应该都见过可以调节光亮的电灯，当我们旋转调光按钮，灯光会慢慢变暗，从最亮逐渐到完全黑掉。如果普朗克常数大很多的话，我们将不会看到这种明暗的缓慢变化，相反，光会一级一级地变暗，每两级之间会有明显的跳跃感。它可能只有少数几个明暗级别，就像我们见到的 50—100—150 瓦的灯泡，这种灯只能通过开关选择这三个明亮级别之一。如果普朗克常数大很多的话，这种 50—100—150 瓦灯泡的特性就会成为光的内在属性，而对明暗的连续调节就会成为不可能完成的任务。当然，普朗克常数显示，对于足够敏锐的“眼睛”（在这里，指的是电子眼，而非生物眼），真实世界中并不存在调光按钮；光的明暗变换都是跳跃式的，只是跳跃的间隔非常小，大约四千亿分之一尔格，因此我们的眼睛无法感知这种跳跃，所看到的都是连续的明暗变化。实际上，正是由于人眼无法捕捉到微妙的变化，现实世界中许多重要的设备才得以正常运作。比如，电视和电脑的屏幕都会在每秒钟内显示上百甚至上千幅有细微差别的图像，从而制造出动态图像的幻象。

量子理论的胜利

正如前文所述，经过很长一段时间以后，量子假说的重要性才获得全面认可。事实上，有一点很奇怪，虽然在牛顿所处的时代，传播方式只有口耳相传、信件、书籍和杂志等，而在普朗克所处的时代，信息的传播速度已经接近光速，然而当年科学界接受牛顿的万有引力却要比后来科学界接受普朗克的理论迅速得多。

直到 1905 年，也就是爱因斯坦的“神奇之年”，物理学家才意识到普朗克的量子假说并非只是一个数学技巧而已。那一年，爱因斯坦发表了三篇著名的论文，其中第一篇便是关于光电效应的。光电效应最初由无线电波的发现者海因里希·赫兹观察到，后来菲利普·莱纳德在 1902 年进行了更加精确的分析。莱纳德发现，当亮光射到特定金属上时会有电流产生。莱纳德并对两种不同光源（锌弧灯和碳弧灯）所引致的电流中的电子动能进行了比较。虽然来自两种光源的光均由不同频率的光混合而成，但碳弧灯所产生的光的中心频率要比锌弧灯的高，相应前者光的平均动能也要比后者的要高。

人们可能会认为如果增加光的强度，那么所引致的电子动能也会相应增强。但莱纳德却通过实验证明这种想当然是错误的，电子的平均动能实际上取决于光源的频率。因为此项惊人成果，莱纳德荣获了 1905 年的诺贝尔奖。同年，爱因斯坦便运用普朗克的量子假说解释了这一成果。要让金属原子释放出一个电子需要对其施加一定的能量。如果用于制造电子的光源频率不足，使得光的能量 $h\nu$ 无法达到释放电子所需的能量，那么电流就不会产生。这种现象有点类似于物体的温度需要达到熔点才会熔化一样。一游泳池的水全部烧至 100 摄氏度，其中的热能足以熔化钢铁。然而此时若将一块铁丢在水池中，则什么也不会发生，因为水池中的热能无法达到足够高的温度。借助普朗克的量子假说，爱因斯坦认识到光电效应也可以用类似的临界点效应来解释，他因此获得了诺贝尔奖。为避免有人忽视其论文中的数学部分，爱因斯坦特别强调：“单色辐射……从热力学上看就像是由分立的、强度为 $h\nu$ 的量子构成。”[11]

更多印证紧随其后。1913 年，丹麦物理学家尼尔斯·玻尔提出了一种新的原子模型。正常情况下一个原子具有一定的能量，玻尔将之称为原子的基态。通过吸收特定能量的光子，原子可以借此增加能量，但每

次只能增加特定的量。能量的增加会使原子进入激发态。在某种激发态下，原子会释放出具有特定能量的光子，通过公式 $E = h\upsilon$ 可计算出其频率。特定频率也就意味着特定颜色，这样玻尔的原子模型为各种不同原子光谱的颜色问题提供了解释。正如普朗克的公式为维恩从实验得出的辐射强度公式提供了解释一样，玻尔的原子模型也为物理学家约翰·巴耳末根据实验所提出的氢原子谱线公式提供了解释。

爱因斯坦后来写道："该发现奠定了 20 世纪所有物理学的基础，几乎完全决定了其此后的发展。"[12] 他是在一篇名为《纪念普朗克》的文章中写下以上文字的，文章写于 1948 年，到那时普朗克的量子假说已经完全改变了我们的宇宙观，比如光和电子的波粒二象性、海森堡不确性定理（一个粒子的位置和动量不可能被同时确定）以及观察者效应（粒子位置的测量必然搅乱粒子的动量，反之亦然）等。

宇宙的这些属性是如此怪异，在几乎一个世纪之后，人们依然还在努力，试图将科学家的研究以一种能令其满意的方式解释清楚。如今书店里充斥着各种关于这些现象的读物，数量之多就像对电视剧《迷失》的分析一样。我希望读者能够从中找一两本或更多本（是书，可不是对电视剧的分析）来读一下。正如英国天文学家亚瑟·爱丁顿爵士所说："宇宙不仅是奇异得超乎我们想象，而且是奇异得超乎我们所能想象。"[13] 宇宙甚至比电视剧《迷失》更加奇异。

注释

[1] J. Heilbron, *The Dilemmas of an Upright Man* (Berkeley: University of California Press, 1986), 3。

[2] 同上。

[3] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Philipp_von_Jolly（2011 年 1 月 11 日有效）。

[4] S. Brandt, *The Harvest of a Century* (Oxford: Oxford University Press, 2009), 29。

[5] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum（2011 年 1 月 11 日有效）。

[6] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Jeans_Law（2011 年 1 月 11 日有效）。

[7] J. Bronowski, *The Ascent of Man* (Boston: Little, Brown, 1973), 336。

[8] 可参见 http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Taylor.html（2011 年 1 月 11 日有效）。

[9] J. Heilbron, *The Dilemmas of an Upright Man* (Berkeley: University of California Press, 1986), 23。

[10] 可参见 http://www.almaz.com/nobel/physics/1918a.html（2011 年 1 月 11 日有效）。

[11] R. Zimmerman, *An Amateur's Guide to Particle Physics: A Primer for the Lay Person* (Pittsburgh: Dorrance Publishing Co., 2003), 15。

[12] A. Einstein, *Out of My Later Years* (New York: Citadel Press, 1976), 229。

[13] 可参见 http://en.wikiquote.org/wiki/Arthur_Stanley_Eddington。实际上，维基语录上称这句话并非出自爱丁顿之口，而是改编自生物学家 J. B. S. 霍尔丹的一句话：“宇宙不仅比我们设想的要奇怪，它甚至比我们所能设想的还要奇怪。”（*Possible Worlds and Other Papers*，1927：286）不过，所有我认识的人都认为这是爱丁顿说的。



第 9 章 史瓦西半径

如果我拥有无尽的时间和空间或者我真的能够转世再生的话，我希望成为一名天文学家。我认为天文学是所有科学中最有趣的一门，这可能是因为我能相对容易地理解该学科的文章，甚至是一些技术性文章。在工作方式上，我认为天文学是最接近数学的一门科学。长期以来，人们都无法像在物理学、化学或生物学中那样通过实验来研究数学或天文学。当然，如今计算机技术已经改变了这种情况，模拟实验已经成为天文学研究中不可或缺的一部分。同时空间探索的进展也以一种百年前人们无法预料的方式，使人们能与太阳和行星“亲密接触”。不过，许多伟大的天文学成就都是在计算机技术出现和空间探索起步之前获得的，这一点也证明了人类智慧的了不起。史瓦西半径便是其中最好的例子之一，这一概念描述了恒星死亡之后所残留下来的黑洞。要充分理解这一概念，我们首先要了解一下恒星的寿命问题。

除太阳以外，所有其他恒星都距离我们非常遥远，而距离地球 1. 5 亿千米的太阳也实在算不上很近。即使将半径为 700 000 千米的太阳视为半径只有 8 厘米的柚子，太阳与地球之间的距离仍然会有 16 米之遥（地球如果按照这种比例计算，则大概只有一颗 BB 弹大小，半径不过 3 毫米）。太阳光抵达地球需要 8 分钟的时间，而另一颗距离地球最近的恒星比邻星，其光芒抵达地球则要经过 4. 3 年的时间。即使套用我们上述比例，比邻星与太阳之间的距离也有 4500 千米之遥；如果将那个柚子放在洛杉矶道奇棒球场的本垒板上，地球大概位于球场的投手区，而比邻星则会跑到加拿大新不伦瑞克省那么远的地方。

在 1950 年以前，要对天体状态进行研究，天文学家手中只有两样工具：其一是对恒星释放出的电磁辐射进行分析，其二就是使用万有引力、热力学、电磁学以及核合成理论来预测恒星这团气体的状态。

人类能够对距离我们如此遥远的事物积累这么多认识，实在是一件令人惊叹的事情。

卡尔·萨根以及恒星分类

卡尔·萨根在《宇宙》一书中提到了一件事，在他还是个小孩子的时候，他去当地一家图书馆寻找关于星星（star）的书。[1]然而图书管理员却找来一本关于电影明星（star）的书给他。当然，这并非小萨根所寻找的东西。

1980 年该书出版后，我读到这个故事，心中不免有点悲哀，star 一词竟然让人首先联想到是明星，而非天文学。不过这还算可以容忍的吧。我直到 2000 年才结婚，而我的妻子琳达对明星的兴趣比我浓厚多了。坐飞机时，我总会带一本最新的《科学》或《科学美国人》杂志，而琳达则会带上一本《人物》杂志。有天，我闲来无事，随便翻开一本琳达的杂志，我突然发现（想必其他人也有类似的发现）原来 star 的两种意义之间的相似处比我原先想象的要多。（即便如此，我仍然希望人们在看到 star 一词时，首先想到是天空中的星体。）

首先，到底什么才算明星？我以为最合理的定义是指那些被广泛关注的人物。当然，“广泛”一词显得有点不够精确，我想只要认识他或她的人超出其私人的交际圈就算符合这一标准。如果你有点愤世嫉俗，你可能会发现越有名的人物，越自以为他们的观点举足轻重。由此可引出两者之间的第一个相似处，恒星是一团巨大的“头脑发热”的气态，而明星同样具备这样的趋势。

恒星和明星之间还有两个更重要的共同属性。光度一词可用来形容

其中任何一个。对恒星来说，光度就是单位时间内它辐射出的总能量。其中视光度指可见光的能量，而热光度则指全部辐射能量。对名人来说，光度这个词虽然没有确切的定义，但不妨用它来指代他或她的公众知名度。

另外，我们可以描述恒星或明星的颜色。对恒星来说，颜色是其温度的体现。而对明星来说，这里的颜色并非他们的肤色，而是其热度指标，即媒体对他们的关注度。使用热度来描述这一现象并非全无道理，越来越多的媒体关注让明星感觉焦头烂额，看看泰格·伍兹和梅尔·吉布森就知道了。那么现在，我们对这两种星就有了两种度量标准：温度和光度。我们可以将这两种度量标准分别作为横轴和纵轴得出两张图表，然后把明星或恒星标注上去。

赫罗图

对于明星，我们可以制作一张热度–光度图，其中横轴代表媒体光注度，纵轴代表公众知名度。在这张图中，向上的方向代表公众知名度的提升，而向右的方向则代表媒体关注度的下降。图中的每一个点代表某个明星，这些点在图中并不是完全无规律的随机分布。对于初来乍到者，其公众知名度和媒体关注度的关联十分密切：通常，媒体关注度越高，公众知名度也会越高，反之亦然。因此大量明星的点都会分布在一条倾斜的带上，从图的左上方（公众知名度高、媒体关注度高）到图的右下方（公众知名度低、媒体关注度低。悲哀的是，本书提到的大部分人物都位于该区域，除了大名鼎鼎如爱因斯坦这样的）。但这种关联并不十分严格，还是有大量明星居于媒体关注度高而公众知名度低的区域。许多调查显示，虽然副总统几乎每天都会登上新闻媒体，但相当多

的民众并不知道他的名字，而在这些知道他名字的群体中，也只有少数人能在街上认出他来（我算其中一个）。同时，也有不少明星，具备很高的公众知名度，但却很少登上新闻媒体，比如许多娱乐明星。

另外，这个图也可以用来展示某个明星的事业发展曲线。我们可以将他或她每一年的事业状况在图上标记出来，然后以时间顺序将这些点连接起来，这样整个曲线便代表了该名人历年的公众知名度和媒体关注度的变化情况。有些明星，比如玛丽莲·梦露，其事业曲线一开始位于图表的右下方，然后瞬间声名鹊起，不论在公众还是媒体心中均享有很高的认知度，此后便一直停留在该位置。直到她离世多年，依然如此。

而对于真正的恒星，也一样可以应用这一张图。温度−光度图最早是由两位天文学家埃希纳·赫茨普龙和亨利·诺利斯·罗素在 20 世纪初提出。图中的横轴，温度往右是在下降，相应的颜色由蓝变红；而图中的竖轴，光度往上是在增加（图 15）。

我必须承认，在我最初接触赫罗图[2]时，我也纳闷为何温度要从左往右依次下降。不管是在赫茨普龙的丹麦还是在罗素的美国，习惯的阅读顺序都是从左往右的，而在传统图表中，数值也是从左到右依次提升的。然而，通过公式 $kT = h\upsilon$，我们知道温度 T 随着光的频率 υ 的增长而增长，而光的频率又与光的波长 λ 成反比，波长是两个相邻波峰之间的距离。如果光的频率加倍，意味在一定时间内，其振动次数就要加倍，那么两个相邻波峰之间的距离则必须减半。频率和波长都是光的自然属性，我猜测赫茨普龙和罗素最初是将波长作为图的横轴。后来随着图的进一步变动，他们由于某种原因决定将横轴所代表的参数由波长更改为频率。

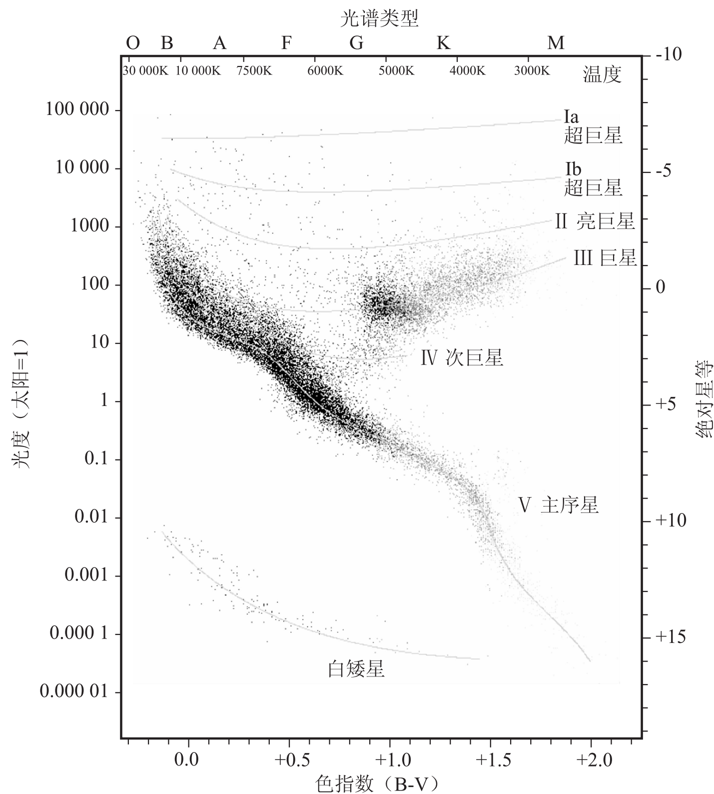


图 15　根据依巴谷星表的 22 000 颗恒星以及格利泽近星星表的 1000 颗低光度恒星制作的赫罗图（制作者：Richard Powell）

每颗恒星对应图中的一个点。等图完成之后，分布的模式便显现了出来，进而催生了对于恒星生命周期的研究。

最明显的分布模式是一条从左上到右下的密集带，类似于前文所述的明星的热度–光度图。这条密集带被称为主序带，大部分恒星都位于这条主序带上。然而，主序带上有两个特性并不见于明星的热度–光度

图。沿着主序带向下观察，从左上到右下，恒星不仅变得更红、光度更弱，同时其质量也越来越小，而寿命却越来越长。主序带左上角的一颗恒星的质量可能会比太阳大六十倍，但其寿命大概只有一千万年。而主序带右下角的一颗恒星的质量可能只有太阳的十分之一，其寿命却能高达一千亿年。

另外有一些恒星群则不位于主序带上。其中一个恒星群我们在之前的章节中已经接触过，即白矮星群。这些星体的密集带几乎和主序带平行，位于主序带的下方。同样平行于主序带，但位于主序带上方的则是巨星和超巨星群。在本章中，我们会重点讲述这一类星体。

同样，我们也可以通过赫罗图中的曲线追踪一颗恒星的生命轨迹，这一点和明星的热度-光度图类似，但也存在重要的差异。我们当然无法实际追踪一颗恒星完整的生命周期，并以此制作一条曲线；即使是最短命的恒星，其寿命也远远超过人类的历史长度。不过，由于恒星的生命周期可以根据其在任意时刻的温度和光度进行确定，所以如果我们发现两颗具有相同温度和光度的恒星，那么它们之后的生命轨迹就是一样的。这一点和明星的事业曲线非常不同，具有相同公众知名度和媒体关注度的明星很可能之后的事业轨迹会大不相同：一个可能飞黄腾达，另一个可能突然陨落，还有一个则可能悄然消失。

根据温度和光度可以判断恒星的生命周期，这一事实可以用地球上抛射体的轨迹来比拟。不妨以炮弹为例，假设我们在地面安置一门旧式大炮（基本上就是一根一端开口的铁管），用其发射同等重量的炮弹，但在发射时会装上重量不等的火药，于是炮弹的轨迹便完全取决于发射时所装的火药重量。任何两个发射时火药量不同的炮弹轨迹都不会重合或交汇。如果能精确测定炮弹在特定时刻的位置，不论是飞在空中还是

坠落到地面时的位置，我们就能计算出发射时大炮装了多少火药以及炮弹的飞行轨迹和整个飞行过程中每一时刻的位置（当然，所有炮弹必须出自同一门大炮）。恒星生命周期和炮弹轨迹的相似性来源于一个事实，即两种曲线都是由微分方程组的解构成，微分方程中包括了不同参数的变化率。许多微分方程，包括有关抛射体运动和恒星中能量平衡的微分方程，均有一个特点，那就是其解均构成一系列互不相交的曲线。

恒星的质量决定它的光度和温度。一颗氢气球的质量必须足够大（达到木星质量的 70 倍），其引力收缩才能将温度提升到足以发生氢聚变的程度。恒星的动力机制是相当简单的。因为引力的缘故，恒星会向内收缩，从而在恒星中心制造出巨大的压强，从而导致高温。能量从高温的内部向低温的表面扩散，并经过表面向外辐射出去。实际上，整个过程并不依赖热核聚变。即使太阳是由煤构成的，仍然会发生同样的事情，开尔文曾经根据这个假说得出结论说，太阳的“燃料”不足以支撑这么长的时间，使得进化论缓慢的自然选择有机会展开。（实际上，幸好太阳不是煤做的，否则其内核的压强会比现在大得多，从而制造出高得多的温度，让我们在一瞬间灰飞烟灭。）

恒星质量的上限最初是由亚瑟・爱丁顿确定的。他计算得出，当一颗恒星达到 120 倍于太阳的质量时，其向外的辐射压力就会超过其向内的引力。[3] 此时，恒星要不就会爆开，要不就会抛掉部分重量降至上限以下。（尽管这一计算结果原则上是准确的，但 2010 年的一篇报道指出恒星 R136a1 的质量超过了太阳的 250 倍。[4] 如果这个估算被确认，那么爱丁顿的计算结果恐怕就要进行修正了。）

不过有一点可以确定，质量极大的超巨星注定会活得十分精彩。如萨根所说，我们都是由这些恒星物质构成。这都是些最最迷人的星体，

它们以不可思议的高温燃烧自己，而它们的寿命又极其短暂，至少对恒星来说十分短命。这一点也和明星很像，我们那个时代的大明星如今多数已经被人遗忘了，而那些光华夺目而又英年早逝的明星，如猫王和玛丽莲·梦露，则至今仍享有广泛的认知度，拥有一批死忠的拥趸。

锝元素之谜

其中一种有趣的恒星物质，除非你是个化学迷，否则你可能对其闻所未闻，不过你或许接触过它，因为它被非常广泛地用做放射性示踪剂。这便是锝，第 43 号元素。锝元素填补了门捷列夫元素周期表三个空白中的一个。伟大理论的标志之一就是其了不起的预见能力，元素周期表绝对满足这一标准。门捷列夫成功预测了第 43 号元素的一些物理及化学属性，他最初将该元素称为类锰，因为在元素周期表中，它位于锰元素的正下方。门捷列夫未能预测出这是一种放射性元素，因为在当年人们还不了解放射性这种属性。

实际上，锝元素并没有一个非放射性的同位素，并且这种元素在地球上十分稀少。由于它是第一种通过人工手段制造出的元素，因而其名称 Technetium 便得自希腊语 tekhnitós（人造）一词。该元素的发现者是埃米利奥·塞格雷，他在一个废弃的放射性粒子回旋加速器的钼箔中发现了锝的存在。日后人们发现，绝大多数锝的同位素寿命都极其短暂，但其中也有两种的半衰期（放射性衰减至原来一半所消耗的时间）长达数百万年。

小的时候，对于人类如何知晓此类数据，我一直迷惑不已。我知道，没有人能活那么长的时间来测量这些数据！答案就是微积分。

假设你有两桶锝元素，其中一桶的分量比另一桶多一倍。将它们放置一段之间，之后再测量一遍两边的重量，你会发现，虽然两桶的锝都比之前少了，但多的那桶仍然是少的那桶分量的两倍。变化的量与当下的量成正比。

用来解答这个问题的微分方程形式为 $f(t)=N\times 2^{t/h}$，其中 t 代表已过去的时间，N 代表最初测量时的量（对应 $t=0$ 时），h 在随时间而增长时（如细菌的繁殖）为正值，在随时间而衰减时（如放射性衰减）为负值，而其绝对值便为物质的半衰期。

假如我们使用盖革计数器来测量物质最初的放射性，发现其计数率为每分钟 1000 次。100 小时后，我们重新测量相同的物质，发现其计数率为每分钟 999 次。由于计数率与当下放射性物质的总量成正比，我们可以将其简化为每单位物质每分钟制造一次计数。于是最初的质量 $N=1000$，而函数 $f(100)=999$，于是 $999=f(100)=N\times 2^{100/h}=1000\times 2^{100/h}$，即 $0.999=2^{100/h}$，最后通过求对数便可算出 h 的值。不论是运用常用对数（以 10 为底数）还是自然对数（以 e 为底数），结果都一样。由于人们可能对常用对数比较熟悉，在此我们就使用常用对数。通过利用对数的一个著名性质，我们可以得出：

$$\lg 0.999=\lg(2^{100/h})=(100/h)\lg 2$$

等式两边同时乘以 h，再同时除以 $\lg 0.999$，可得出：

$$h=100\ \lg 2/\lg 0.999=-69\ 280.1$$

由于 h 为负值，那么其绝对值就是该物质的半衰期，大约为 7.91 年。通过查看半衰期表，我们甚至可以确定这到底是哪种物质，因为大

概只有一两种物质的半衰期为确切的 7.91 年。

事实上，锝元素极短的半衰期证明我们所见的多数元素都是恒星制造的。而锝最长寿的同位素，半衰期能达到 400 万年，它是由其他更重的元素（比如铀）衰变而来的。每过 400 万年时间，它就会衰减一半，因而 10 亿年以后，它将会经历 250 次衰变。由于$(1/2)^{250}$接近于 10^{-76}，又由于宇宙中大约有 10^{80}个原子，其中只有非常少量的锝，因而在远远老于 10 亿年的恒星大气中观测到锝的存在，这一事实便证明锝是在恒星的核心处制造的。这一点初步证明我们对于恒星核心中所发生的过程的理解是正确的。由于这些过程是证明我们都是由恒星物质构成的关键，因此很高兴看到我们的理论得到了支持。

史上最糟糕的实验者

在高中的时候，南希是我的化学实验搭档，这个标题用来描述她是再好不过了。由于她总是能为我弄来香烟（当时抽烟还是件很酷的事情），我们就达成了一个协定：我来负责撰写实验报告，她则负责给我弄烟抽（这些高中时期的叛逆行为在 20 世纪 50 年代的容忍度要比现在大很多）。没想到却差点被她酿成大祸。我至今仍清晰记得，我们本来要将 3 毫升的稀硫酸加入溴酸钠中去，结果南希却加入了 30 毫升的浓硫酸。然后我就看到一团恐怖的橙色烟雾开始生成，那是溴气。万幸的是，老师此时帮我们化解了危险。

不过，还有比南希更可怕的实验者，那就是沃尔夫冈·泡利，据说只要他出现在实验室里，屋子里的实验设备就会离奇地出错。虽然如此，泡利却是一位才华横溢的理论物理学家，他的泡利不相容原理成功解释了白矮星的形成机制。

泡利不相容原理是量子力学中一个非常重要的概念。它指出没有两个费米子（包括电子、夸克以及由它们构成的中子和质子等）可以具有相同的量子态。量子态是各种量子属性的统称，能级就是其中之一。该原理的一个推论是距离相近的电子必须拥有不同的能级。电子通常都是占据低能级的轨道，但如果有太多电子挤在一起的话，其中有些就要被挤到高能级的轨道。这些电子之间会产生一种为电子简并压力（在第 11 章中我们会再次接触到这个名词）的压力。不同于理想气体中的压力，这里的压力是一种量子力学效应，不受温度影响。这一点在恒星内部产生了有趣的效果，电子简并压力和核聚变产生的辐射压力一起，阻止了引力塌缩的发生。然而核聚变终会停止。在某些被称为白矮星的恒星中，核聚变停止后最终留下的通常是碳和氧元素，它们由于剩下的高温而会继续发出光芒，内部则由电子简并压力抗衡引力的作用。而在质量大的恒星中，可以进一步进行核聚变，不过最终也会终止于铁元素，因为铁元素的核聚变需要吸收能量而不会释放能量。当核聚变产生的辐射压力不存在时，假如恒星足够大的话，引力的作用将完全压倒电子简并压力。在大约十分之一秒的时间内，引力塌缩会以四分之一光速的速度发生。电子会被并入质子转化为中子，最终整颗恒星将由中子构成。几个太阳的质量被塞进一个可能直径只有十几千米的球体内。塌缩的反向冲击波会将恒星外层撕碎，于是一颗超新星便出现在天上。在这一瞬间，恒星会释放出百倍于太阳一生所创造的能量，其中大部分能量都以中微子的形式释放出去。

宇宙一介子

对于中微子来说，物质可以任其穿行，正如诗人约翰・厄普代克在

《宇宙一介子》一诗中所写的①：

中微子，极其细小
既不带电荷也没有质量
因此全然没有交互作用
对中微子而言，地球只不过是颗愚蠢球体
它们能轻易地穿透
就像清洁妇走过透风的走廊
或像光子穿过一块玻璃
它们看不起最绝妙精致的气体
无视最坚固的墙
冷眼对待钢铁与发声作响的铜
羞辱厩中的种马
并且嘲笑阶级的藩篱
穿透了你我！像座高耸
且无痛的断头台，它们掉落
穿过我们的头顶到草地上
在夜幕低垂时，进入尼泊尔
且从床底下穿透恋爱中的男人和其情人
你称这种行为
很棒；但我却视其为愚蠢。

如果太阳产生超新星爆炸，那么厄普代克恐怕就不只是用愚蠢来形容了（不过无需担心，太阳的质量还不够）。虽然一个中微子能够穿越

① 以下文字引用了许慧伶和倪无言的译文，可参见203.64.184.213/poetic/human/CosmicGall.php。——译者注

一光年厚的铅层而不碰触其中任何一个原子，但太阳的超新星爆炸所产生的中微子则会因为数量太多、能量太强，其放射物足以杀死哪怕远在木星上的人类。

顺便提一下，在厄普代克的诗里有一个很小的专业性错误——中微子的质量尽管不大，但还是有质量的。厄普代克在 2009 年离开了人世，很遗憾他没有写下更多关于中微子的诗歌。面对中微子的诸多神秘而迷人之处，我想诗人会诗兴大发的。比如中微子有三种形态，并且它们能够在飞行途中进行形态的转换。[5] 中微子竟然可以自行变性！真应该有人在厄普代克生前把这件事告诉他才对。

超新星爆炸之后的事则要取决于恒星最初的质量。如果残余的中子核质量小于 2. 5 个太阳质量，那么它将持续作为一颗中子星存在。中子星中心处 1 立方厘米的材料会重达惊人的 10^{14} 千克，星体表面的重力会是地球重力的 1000 亿倍以上。如果残余部分的质量小于 2. 5 个太阳质量，其中子简并压力依然能抗衡这一挤压力，中子星也会持续存在。然而如果残余部分的质量大于 2. 5 个太阳质量，那么其中子简并压力也无法与引力相抗衡，于是整个星体便会以黑洞的形式消失在宇宙之中。

黑洞的确是名副其实，因为在这个空间内引力无比强大，即使是光也无法从中逃出。虽然“黑洞”一词首次进入公众视野是在 1967 年左右（当时物理学家约翰 · 惠勒创造了这一名词），但黑洞的概念则要追溯至两百多年以前的约翰 · 米歇尔，也就是那位将扭秤转给亨利 · 卡文迪许，使后者借此测出地球密度和重量的人。实际上，米歇尔在给卡文迪许的信中写到：“如果密度和太阳一样的一个球体的半径与太阳半径的比达到 500∶1，那么从无穷高度坠落到该球体上的一个物体在抵达其表面时将获得超光速的速度。因此假设光与其他物体一样也受到与其惯

性成正比的引力的吸引，那么从该球体所发射出的所有光都会被其引力给吸回去。”[6]这真是了不起的内容，在其中，米歇尔不仅预言了光子的存在（光同样受到引力的吸引），甚至在一定程度上对黑洞进行了数学推算。

然而，米歇尔的工作并未引起太多关注。直到第一次世界大战期间，一位在俄国前线的德国士兵才重新引起人们对于黑洞现象的兴趣。

卡尔・史瓦西

我很幸运，没有赶上两次世界大战和朝鲜战争。而在越南战争爆发时，虽然我已经到了服兵役的年纪，但在美国政府看来，我去做数学研究似乎要比参军打仗对国家的益处更大。当时我应征去参加体检（这我通过了）和智力测试。当考官发现我是一名伯克利大学的毕业生时，他说他期待我能创造出新记录，至少考出那一个征兵站的最好成绩。我恐怕让他失望了。开始的两个部分分别是词汇和算术，对此我手到擒来。第三部分是考空间关系。试卷上是一个形状奇特的图案，其中还有一些虚线，问的是按虚线折起来后会成为何种立体形状。这方面我不是太擅长，因为我的空间感并不太好。不过这与第四部分相比可是小巫见大巫。第四部分列出各种工具，然后问这些工具是做什么用的。由于其中没有一个是锤子或斧子之类的，所以我也不知道有没有蒙对一个。不管怎样，整个越南战争期间，我大多在进行数学的教学和研究工作。我很庆幸自己不用去服役，因为我知道如果我被送到前线的话，大概一天到晚所想的就是什么时候才能回家。

卡尔・史瓦西的个性则比我要坚强得多。爱因斯坦于 1915 年发表广义相对论时，史瓦西正在俄图前线，他不但设法找来了相关资料进行

研究，而且还做出了重要的成果。广义相对论的核心是一系列微分方程（微分方程在我眼中就是宇宙的通用语言，因为它频繁出现在各科学领域当中），而史瓦西则是首位给出这些方程准确解的人，他把这些研究成果寄给爱因斯坦。爱因斯坦十分看重这些成果，亲自送交给普鲁士科学院，并由其将这些成果发表了出来。

令人唏嘘的是，随后在 1916 年，史瓦西由于在俄国前线所感染的自身免疫系统疾病而离开了人世。“一战”可能是人类历史上最后一场将敌对阵营同样视为人的战争了。化学疗法之父保罗·埃尔利希去世后，他被整个世界公认为对人类境况的改善作出了重大贡献。而对于史瓦西的离世，爱丁顿则说道：“战争夺去了无数人的生命，科学界也不能幸免。在我们的阵营，我们没有忘记物理学家莫塞莱在远大前程即将到来之时撒手人寰；如今，在敌对阵营中，则传来了史瓦西英年早逝的消息。长期以来，他深受在战场中所感染疾病的折磨，并展现出了了不起的勇气和忍耐。世界从此失去了一位卓越的天文学家。”[7]

史瓦西是在广义相对论的框架里得出其成果的，不过通过简单的牛顿物理学也可以理解其中的基本思想，正如米歇尔所做的那样。设想一个质量为 M、半径为 R 的无旋转的球体，并在该球体的表面以速度 v 向上发射一枚质量为 m 的抛射体。如果抛射体动能 $1/2mv^2$ 不足以抵消球体所施加的引力势能 GMm/R 的话，那么它将无法逃离出该球体。而一个抛射体所能达到的最高速度为光速 c。因此，如果 $GMm/R > 1/2mc^2$，那么甚至光都无法逃离该球体。在不等式两边可以同时除以 m，再解得 $R < 2GM/c^2$。因此质量为 M 的球体，只要其半径小于 $2GM/c^2$，那么没有光（也就没有信息）能够逃离该球体。$2GM/c^2$ 的值便被称为史瓦西半径，而半径为史瓦西半径、质量为 M 的球体的表面称为事件视界。就我们所知，在事件视界里面，没有任何活动发生。不过鉴于一切信息都

无法从里面传出，或许存在极其微小的可能，里面正举办一场热闹的派对。

和本书讨论的其他常数不同，史瓦西半径并非一个严格意义上的常数，因为它的数值要取决于质量 M。地球（或者更准确的说，相当于地球质量的物体）的史瓦西半径大约为一厘米，而太阳的史瓦西半径为三千米。

黑洞通常被视为恐怖的黑色球体，在我们的想象中，它的密度非常之大，甚至远远超过中子星的密度。一个浓缩至一个点的黑洞，其密度是无穷大，如果这一点说得通，那么巨大黑洞的密度则会小得令人吃惊。一个星系的重量大约为 10^{42} 千克，因此其史瓦西半径大约为 10^{15} 米。这样的一个球体的体积大约为 4×10^{45} 立方米，那么此黑洞的密度大约就是 1/4000 千克每立方米，即 1/4 克每立方米。在海平面的空气密度大约为 1200 克每立方米，因此空气密度大约为一个银河系般大小的黑洞密度的 5000 倍。

黑洞的理论研究已经开始很长时间了，而对于黑洞存在与否的证据收集也已经有四十多年了，天鹅座 X－1 似乎具备黑洞的所有特征。

热闹的派对

前面我提到过，史瓦西半径并非一个严格意义上的常数，因为不同的质量下会有不同的史瓦西半径。不过我突然想到，其中也有一个史瓦西半径是绝对常数，即整个宇宙的史瓦西半径。

对于整个宇宙的质量，如今已经有比较合理的估值（科学家有信心

实际值不超过估值的五倍）。如果我们根据估值来计算宇宙的史瓦西半径，会得出一个介于 100 ~ 1000 亿光年之间的数据。而已知宇宙的半径大约为 130 ~ 140 亿光年，因此这仍然在它的事件视界之内，而且那里的确正有一场热闹的派对。不过宇宙仍然在持续膨胀，在未来的某个时刻，宇宙的半径可能会超过其史瓦西半径。这是否会发生呢？我向好几位物理学家提出了这个问题，但并未得到一个满意的答复。或许宇宙会膨胀到史瓦西半径的临界点，然后开始收缩，像超新星爆炸那样释放出冲击波。当然也可能是别的什么情况。我是看不到这一天了，但或许我能活到人类探明这一奥秘的那一天。

注释

[1] Carl Sagan, *Cosmos* (New York: Random House, 1980), 134。

[2] 可参见 http://www.le.ac.uk/ph/faulkes/web/stars/o_st_overview.html（2010 年 12 月 22 日有效）。

[3] 可参见 http://scienceworld.wolfram.com/physics/EddingtonLuminosity.html（2010 年 12 月 22 日有效）。

[4] 可参见 http://www.space.com/scienceastronomy/eso-massive-stars-discovered-100721.html（2010 年 12 月 22 日有效）。

[5] 可参见 http://www.unisci.com/stories/20022/0423021.htm（2010 年 12 月 23 日有效）。

[6] James Stein, *How Math Explains the World* (New York: HarperCollins, 2008), 196。

[7] Kameshwar C. Wali, *Chandra: A Biography of S. Chandrasekhar* (Chicago: University of Chicago Press, 1990), 140。

[8] 可参见 http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_l2/black_holes.html（2010 年 12 月 22 日有效）。



第10章 氢聚变的效率

我上大一的时候，乡村歌手史琪特·戴维丝一首名叫《世界末日》的歌冲上了排行榜的第二名。歌里提出一个十分哀怨的问题：“太阳为何依旧闪耀?”[1] 因为心碎的人感觉已经到了世界末日。从中我们也可了解到，乡村歌手或乡村音乐创作者在问大问题上并不靠谱。事实上，这里的大问题不应该是太阳为何依旧闪耀，而应该是太阳何以依旧闪耀?我想人们自古以来都在渴求这个问题的答案，但直到 19 世纪，物理学家才研发出能够解答这个问题的计算工具。19 世纪的物理学家所得出的答案最终归究到了数字 0.007 上面，这个数字从某些方面来讲是本书中最重要的一个数字。接下来大家就会了解到，如果这个数字比现在或高或低一点的话，这本书以及《世界末日》这首歌，还有所有其他的书籍和歌曲，就都不会存在了。

太阳的功率

开尔文男爵可能是首位以科学视角看待太阳何以依旧闪耀这一问题的人。他首先从计算太阳所产生的功率开始。通过在大气层上部测量接收的太阳光，我们发现每平方米会接收 1.3 千瓦。（我们不能在地球表面测量，因为在光线抵达地球表面之前，大气层已经吸收了一些太阳光的能量。幸亏如此，否则的话，即使在南极我们也要套着游泳圈了。）太阳向各个方向辐射的能量显然是均匀的，而以上我们测算功率的平面则位于一个巨大球体的表面上，该球体的半径就是太阳和地球之间的距离。我们知道，这一距离约为 1.5×10^{11} 米，并且当一个球体的半径为 R 时，其球体的表面积为 $4\pi R^2$。于是可以计算出该球面从太阳接收的功率为 $4\pi\ (1.5\times10^{11})^2\times1.3=3.7\times10^{23}$ 千瓦。而功率是能量产生的比率，1 秒钟内转换 1000 焦耳能量的话，功率便是 1 千瓦。如果太阳通过燃烧像辛烷这样的化学燃料来提供能量，大概每摩尔燃料会产生 300 焦

耳的能量。太阳的重量为 2×10^{30} 千克，而辛烷（C_8H_{18}）的分子量为 114。所以 1 摩尔辛烷重 114 克，即 0. 114 千克。如果太阳是由辛烷构成的，那么就会有 $2 \times 10^{30}/0.114 = 1.75 \times 10^{31}$ 摩尔辛烷。这样燃烧完整个太阳便会产生大约 $1.75 \times 10^{31} \times 300 = 5.3 \times 10^{31}$ 焦耳的能量，燃烧时间为 $5.3 \times 10^{31}/(3.7 \times 10^{23}) = 1.4 \times 10^{10}$ 秒，即大约 500 年的时间。即使假设太阳是由氢气构成的，那么也只可以燃烧大约 5 万年时间。然而 20 世纪以前的人们也知道地球的存在已经超过数亿年之久。因此，不论太阳何以依旧闪耀，它所依靠的绝不会是普通的燃烧进程。

想通这一点后（虽然开尔文在计算过程中是以煤为例而非辛烷或氢气），开尔文开始寻找其他的能量来源。他发现太阳上的物质从外层向核心坠落的过程中能将势能转化为动能，这能够维持太阳数千万年的能量需求，然而依然不够。

那么到底太阳何以依旧闪耀呢？解答这个问题的大部分基础工作都是在物理史上最激动人心的时期，即在 1895 ~ 1905 年的十年间建立起来的。借助当时三项革命性的发现，人类开始探索原子的内部世界。不过，这一难题的最终答案则要一直等到“二战”爆发前才能揭晓。

青枝骨折

和大多数孩子一样，我小的时候也不太注意自己的健康状况。而且除了三岁时在一次哮喘发作期间注射过肾上腺素以外（我是完全没有印象了），我几乎没有受到任何儿童疾病的困扰，我的阑尾和扁桃体都安然无恙。记得在一次腮腺炎痊愈以后，父母带我去了大西洋城玩，因此整个生病经历对我来说乐多于苦。当然，每年都要做体检，体检内容里有一项具有 20 世纪 40 年代特色的验血方式——用一个类似鱼叉的可怕

工具在手指上扎一个洞。虽然只是被玻璃吸管取走几滴血，但整个感觉却让人非常不舒服。就这样，在父母受邀带我去访问一些拥有马匹的朋友之前，我的身体都是安然无恙的。

我对骑马十分反感，但显然在与父母的沟通过程中，我不太有说服力。那些马都比我高大得多，而且十分任性。然而我是个很顺从的孩子，所以当父母提议我去骑一圈时，我就骑上去了。不一会儿之后，肯定是我不小心从二档调到了三档或四档，马匹突然加速起来，我一下子从马后掉了下来。落地时我用左胳膊撑了一下地，只感觉手一阵疼。但疼痛稍稍缓解后，我又重新上马，完成了整个骑行。

隔天，我的左胳膊就肿了起来，十分酸疼，父母于是带我去一家当地的医院检查。医生给我照过 X 光后，拿着 X 光片告诉父母我的胳膊发生了青枝骨折。从 X 光片上能很清楚地看到这一点：我胳膊上一根骨头的样子就好像我们尝试掰断一根青枝一样——没有完全折断，但有部分断裂，我的骨头仍然连在一起，但有的地方呈现出磨损和撕裂状况。

事故发生在六月初，那一整月我的胳膊都打着石膏，忍受着伊利诺伊炎热潮湿的夏天。痊愈的过程中几乎没有什么疼痛，但那个月却好像永远也没有尽头。恰如奥格登 · 纳什（可能并非 20 世纪最有名的诗人，却显然是最具娱乐性的一位）所说：“四下无人一乐事，浑身痒痒可意挠。”[2]

在 20 世纪中期，科学给人的印象比现在更为深刻，因为当年科学的产物与人们日常生活的物件相比要更为醒目。例如，在众多日常生活的普遍物件中，我胳膊的 X 光片就显得异常突兀。几年前，我岳母要做肩膀的核磁共振成像，这项技术比我拍摄青枝骨折时鬼影般的 X 光复杂

多了，然而所有人对此却都泰然自若。说来也是，如今随便在电脑上点一下鼠标，多少光怪陆离的东西便会呈现在眼前啊！

或许我那一代有些孩子有过相同的受伤经历，有感于青枝骨折愈合过程中的神奇，从而走上了医学道路。但我对其愈合过程毫无兴趣，满脑子想的只是希望它快点好，快点让我摆脱这该死的石膏，得以尽情享受“四下无人一乐事”。不过，我却对 X 光的原理充满遐想：如何可以穿透肉眼看上去不透明的物体，从而拍摄到里面的构造，哪怕得出的只是灰白的图片？

科学的进步至少有两个主攻方向：其一是对已知现象提出新的解释，比如牛顿对于行星运行的解释以及普朗克所提出的辐射强度曲线；其二就是发现新的现象。现在回想起来，菲利普·冯·祖利对普朗克说的话（物理学中残留的工作就是填补少量缺失的细节）简直是错上加错。事实上，物理学不仅填补了缺失的细节并由此开辟了新的领域供人们探索，正如普朗克所做的，它还发现了很多新现象，对于这些新现象 19 世纪的物理学完全无法提供解释。其中一种新现象便使得六十多年后我的青枝骨折 X 光诊断成为可能。

有些科学发现得益于好运气，亚历山大·弗莱明发现青霉素能够防止细菌感染便是一个很好的例子。[3] 但正如洛杉矶道奇棒球队的前总经理布兰奇·里奇所说，好运是除去机会和谋划之后的残余部分。[4] 直到 19 世纪末，科学家仍然不清楚电是什么东西。虽然他们对于电在金属中的各种表现已经非常了解，同时对于电在液体中的各种表现也有大致的了解，但他们对电在气体中会如何表现则知之甚少，因此这便成了一个主攻方向。

威廉・伦琴

如果人们在 19 世纪 90 年代初下注预测谁会是赢得诺贝尔奖的第一人，威廉・伦琴一定是其中最黑的黑马。他曾经在高中的时候，因为不肯指认一个画画侮辱老师的同学而被勒令退学。当时德国的教育制度十分严苛，对威廉・伦琴的惩罚是他不仅要离开先前的学校，并且未来也无法在德国或荷兰的任何一所学校中接受教育。我想德国当局大概对按罪量刑的概念不太感冒吧。不过还好，伦琴通过申请就读一家瑞士的大学而绕过了这一惩罚。当时的德国对于拒绝告密的罪名一定是有一个诉讼时效，否则伦琴不会最后又杀回到德国学术界。他的大部分职业生涯均在当时德国不太知名的大学中度过，先是在霍恩海姆大学，然后是吉森大学，最后则是维尔茨堡大学。他的事业一直碌碌无为，到 1895 年 11 月。

科学发现常常得益于技术的进步，假若没有显微镜，安东尼・范・列文虎克恐怕只是一位荷兰的服装商人，而不会成为微生物世界的发现者。在 19 世纪，越来越好的设备被研发出来，不仅能够更方便地生产电力，也能够更好地研究低气压下的气体。克鲁克斯管[5] 便是其中之一，这是一种使高压电流通过低压气体的玻璃容器。电流在阴极发出，而在阳极或玻璃壁上有时候可以观测到荧光现象。荧光的产生难以控制，它取决于众多因素，包括气体种类、克鲁克斯管的造型以及所放电的电压等。

伦琴当时已经 50 岁了，早已过了牛顿所说的发明创造的黄金年岁。但他很幸运，在做实验时，正好在克鲁克斯管旁边放着一张涂了氰亚铂酸钡的纸，这种物质在紫外线的照射下会发出荧光。当他为玻璃管通上

电时，氰亚铂酸钡上便发出了荧光！伦琴随后在完全秘密的情况下花了七周时间研究这种现象。其中一个发现就是此类射线会在感光胶片上留下痕迹。伦琴研究两周之后，他用妻子安娜的手制作了世界上第一张 X 光片。看见自己手的骨架后，安娜惊呼："我看到了我的死亡！"[6]

七周之后，在 1895 年临近结束的时候，伦琴发表一篇题为《论一种新型射线》[7] 的论文。伦琴将这种能够制造荧光的射线命名为 X 射线——X 在数学中是用来表示未知数。论文第二页是对伦琴妻子的手的 X 光片的描述："将手放在荧光屏前，会显示出骨骼的黑色阴影，以及周围组织的淡淡轮廓。"[8] 这一发现不仅即将变革医学，不出所料，也为伦琴带来了新的转机。1900 年，他接受了慕尼黑大学的教授职位，从而进入德国的知名大学。随后在 1901 年，他又获得首届诺贝尔物理学奖。他将奖金捐献给了他的大学，并拒绝为他的发现申请专利，尽管专利会给他带来巨额财富。他希望全人类能够分享他的成果。

尽管在 1895 ~ 1897 年间，伦琴共发表了三篇关于 X 射线的论文，但一直到他赢得诺贝尔奖时，X 射线究竟是什么依然是个谜。伦琴没有对这一问题作进一步探讨，1897 年的那篇论文便是他的最后一篇，而他在慕尼黑大学期间也并未积极参与科学研究工作。对 X 射线属性的研究工作于是落到了马克斯 · 冯 · 劳厄以及众多对伦琴停止研究感到不解的人们肩上。冯 · 劳厄曾在火车的三等车厢偶遇过伦琴，对此他有其见解。

> 经常有人会问，为何他在 1895 ~ 1896 年取得了如此划时代的成就后便归隐江湖了。人们猜测出各种动机，其中有些是出于对伦琴的尊敬。但我认为这些猜测全是错的。在我看来，人们对于这一发现的印象和期待几乎将他压垮了，在 50 岁时

> 才作出重大发现的他此后再也没有缓过来。虽然只有少数人意识到一点，但伟大的成功对他来说是个负担……事实上，伦琴在 1895 ~ 1897 年间所做的三篇论文需要花费极大的心血，因为它们已经将该课题几乎探索穷尽了，甚至于在之后的十多年间人们几乎无法再做出新东西。[9]

对此我也有自己的看法。我是个棒球迷，在棒球史上，有一个人物与伦琴很相似，即投手唐·拉尔森。拉尔森整个职业生涯的记录并不怎么耀眼，胜场数只有 81 胜 91 负，ERA（平均失分率）为 3. 78，但他却在 1956 年的世界大赛中打出了一场完全比赛，没有任何一名敌队球员到达一垒。或许伦琴也是一样，一位合格但不杰出的“球手”在生命的某一刻做出了绝对伟大的成就。

劳厄在 1912 年发现 X 射线是另外一种形式的电磁辐射，其频率远高于可见光（甚至远高于紫外线）。前面已经讲过，可见光的频率平均为 5×10^{14} 赫兹，而 X 射线的频率则在 10^{18} 赫兹的量级上。通过普朗克公式 $E = h\upsilon$，我们可以了解到相较于可见光，X 射线的能量要高出千倍以上。这一点使得 X 射线能够穿透肉体，但它会被骨骼所吸收，从而制造出伦琴妻子手的 X 光片，以及我的青枝骨折 X 光片。同时，这也解释了为何我们要限制人体接受 X 射线的辐射量；过多的辐射会增加罹患癌症的风险，因为 X 射线的高能量会损坏人体细胞。

放射性的发现

几乎在伦琴使用感光胶片展示 X 射线效果的同时，法国物理学家亨利·贝克勒耳也在使用感光胶片研究各种材料在阳光下发出磷光的能力。荧光和磷光的区别在于，荧光能够将吸收的电磁辐射马上以不同的

波长释放出来，而磷光则不会立刻重新释放出来。贝克勒耳拥有众多可以进行实验的物质，其中之一为一种铀盐——铀和钾的双硫酸盐。他发现这种材料暴露在阳光下时会发出磷光，不过还有其他几种材料也会这样。但有一天，真正惊人的事情发生了。由于接连几天都没什么阳光，铀盐及其下面的感光胶片都被放置在黑暗中。当贝克勒耳冲洗胶片时，原本他以为上面只会有些微的磷光痕迹，但他发现铀盐的轮廓清晰地出现在胶片上。整个过程并没有经过光线照射，而发出磷光是需要能量的，显然是铀盐本身在释放这种能量，只是其能量的产生过程还是一个谜。

对此夫妻档皮埃尔・居里和玛丽・居里展开了大量研究。他们和贝克勒耳一起，凭借其发现共同荣获了 1903 年的诺贝尔物理学奖。皮埃尔・居里在一个雨天意外死在巴黎拥挤的街道上，当时他滑倒在人行道上，结果被一辆经过的马车压过。即便如此，玛丽・居里继续她的研究工作，最终发现了镭元素，这是一种放射性比铀强很多的元素。由于这项发现，居里夫人在 1911 年又获得了诺贝尔化学奖。（她是仅有的四位得过两次诺贝尔奖的科学家之一，她也是唯一一位在两个不同的自然科学领域获奖的科学家。约翰・巴丁获得了两次诺贝尔物理学奖，弗雷德里克・桑格获得两次诺贝尔化学奖，而莱纳斯・鲍林则同时获得过诺贝尔化学奖和诺贝尔和平奖。[10]）

居里夫人将贝克勒耳发现的这一现象命名为放射性。她不仅为之命名，为之付出辛勤的研究工作，甚至可能也是死于放射性的影响之下。在获得 1911 年的诺贝尔奖后不久，她便疾病缠身，并最终因此离开了人世，而她所患的疾病可能正是因为长期暴露于放射性物质而引起或加重的。

电子的发现

伦琴使用克鲁克斯管来作研究是因为该设备也曾用于其他种类射线的研究（前文提到伦琴的论文标题为《论一种新型射线》）。这些射线的产生都要求在接近真空的状态下，这时原子之间的距离要比在液体和固体中大得多，因此人们推测原子还有其结构，而其结构在原子彼此相近时是很难观测的。

1838 年，迈克尔・法拉第发现当电流通过一个含有低压空气的管子时，其间会产生一道光弧，从阴极的前方一直延伸至阳极。但阴极前有一个很短的黑暗段，这被一向细心的法拉第注意到了，因此这也被称为法拉第暗区。随着越来越好的真空设备被制作出来，暗区的长度也随之拉长。而在克鲁克斯管中，暗区却完全消失了，荧光出现在管子的另一端。这一现象被视为一个间接证据，证明有什么东西携带电荷穿过了克鲁克斯管。[11]

1897 年，英国物理学家约瑟夫・汤姆孙带来了首个令人信服的证据，证明有一个比氢原子小得多的微粒可以携带电荷。他的实验目的是测量这样一个微粒（如果存在的话）的荷质比。法拉第曾进行过电解实验，即使用直流电将一种化合物分解为构成该化合物的各种元素。通过实验，法拉第发现电解后的氢气（如今我们称为氢离子）的荷质比为 9.65×10^7 库仑每千克。汤姆孙的实验十分巧妙，其中只运用了一些已知定律的代数演算，因此我们在回顾该实验时，既可以通过语言的描述，也可以通过代数的计算来理解它。

这个实验包含两个步骤（图 16）。第一步，微粒（如今我们知道是

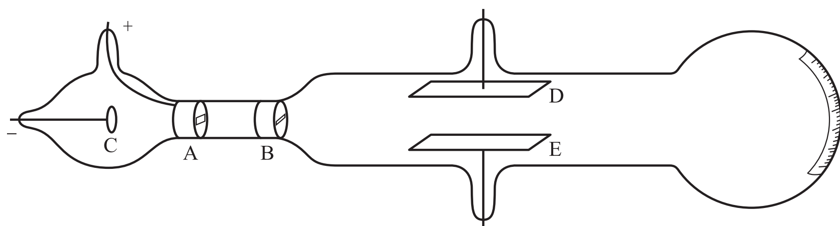


图 16　约瑟夫·汤姆孙的阴极射线实验。射线从克鲁克斯管的阴极 C 射出，经过接地的缝 A 和 B 后形成一束狭窄的射线射到管子的另一端，在管壁上形成磷光亮斑。金属板 D 和 E 接上电池后，射线在电场作用下发生偏转，偏转的幅度可从管壁上的刻度量出（来源：*Philosophical Magazine*，vol. 44，p. 293，1897）

电子）从克鲁克斯管的阴极被发射出来。它受到两个相反的力的作用：上方正电板和下方负电板之间产生的垂直电场力，以及一个垂直的磁场力。电场力会使电子发生垂直偏离，而当电场力和磁场力的强度相同、方向相反时，电子则不会发生偏离。假设微粒携带的电荷为 e（不要和自然对数中的底数搞混淆了），电场的强度为 E，施加在微粒上的电场力为 eE，微粒沿水平方向以匀速 v 运行；同时从麦克斯韦方程组可知，如果磁场强度为 H，那么施加在微粒上的磁场力便为 evH。当两个力均衡时，微粒会沿水平方向前进，这时 $eE = evH$。求解 v，可得出微粒沿水平方向匀速运行的速度 $v = E/H$。

第二步，将发出磁场力的电磁铁关掉。这不会影响电子的水平速度，但由于没有其他力量与电场力相抗衡，电子的运行将完全受电场力 eE 的作用。（当然，重力也会对该微粒发挥作用，但相较于电场力，其影响十分微弱，可以忽略不计。）根据牛顿第二运动定律，$eE = ma$，其中 m 为微粒的质量、a 为其加速度。令微粒在击中正电板之前沿水平方

向运行的距离为 L、垂直方向运行的距离为 d。由于水平方向的速度为 $v=E/H$，水平方向运行 L 的距离所花的时间 T 可以通过 $L=vT$ 计算出来，即 $T=L/v=LH/E$。微粒在垂直方向基于加速度 a 的运行类似于坠落的物体基于重力加速度的运行。计算坠落的物体在时间 t 内的下坠距离 s 的著名公式为 $s=(\frac{1}{2})gt^2$，其中 g 为地球表面的重力加速度，我们在第 1 章已经介绍过。而在本例中，电子坠落的距离 $d=(\frac{1}{2})aT^2$，因为其在垂直方向运行的时间和在水平方向运行的时间相同。

现在，要计算出电子的荷质比便只剩下代数运算了。通过方程 $eE=ma$，可以得出荷质比 $e/m=a/E$。而通过 $d=(\frac{1}{2})aT^2$，可以得出 $a=2d/T^2=2dE^2/L^2H^2$，于是 $e/m=2dE/L^2H^2$，而等式右侧的所有数值均可以非常精确地测量出来。计算出结果之后，汤姆孙发现其荷质比是氢离子荷质比的 1000 多倍。至于他究竟是使用什么气体来创造这些微粒并不重要，因为结果都会是一样的。

根据实验，可得出好几个可能的结论，汤姆孙在他的实验报告中都作了说明。他所选择计算的数值并非上述的荷质比 e/m，而是质荷比 m/e，当然两者互为倒数。汤姆孙写道："m/e 值很小可能是因为 m 值太小，或者 e 值太大，或两种情况同时发生。"然而，对于阴极射线能够畅通无阻地穿行在密集原子之间的事实，汤姆孙认为该微粒应该在尺寸上小于普通原子。两年后，汤姆孙通过紫外线照射在金属上所释放出的微粒再次计算出了相同的荷质比。受到照射的金属带上了正电荷，因为紫外线的能量足以使金属释放出电子，这便是爱因斯坦在他的"神奇之年"所解释的光电效应。[12]

$E = mc^2$

爱因斯坦著名的质能方程可以作为代表人类智慧成就的一个符号。我没有看到有针对该公式认知度的调查报告，不过我猜想，大概每个上过高中的人都至少看到过这个公式，并能意识到该公式与能量、与爱因斯坦，或者与这两者都有着某种联系。该公式是爱因斯坦在“神奇之年”里最重要的成就。这个公式再加上亚原子微粒的发现，为解答太阳何以依旧闪耀的大问题指明了方向。

该公式的意思很简单，就是当一个物体的质量为 m 时，如果将其全部质量都转化为能量，那么所获得的能量 E 就等于物体的质量乘以光速的平方。通过一个简单计算，大家就可以了解即使很小质量的物体中也包含着巨大的能量。

现代公制系统中能量的基本单位为焦耳。1 焦耳指的是施加 1 牛顿作用力经过 1 米距离所需的能量，1 焦耳等于 1 千克二次方米每二次方秒。将 1 千克水的温度提升 1 开尔文（或摄氏度）需要 4000 焦耳的能量，因此焦耳本身并非很大的单位。第一颗原子弹爆炸时所释放的能量约为 80 万亿焦耳，即 8×10^{13} 焦耳。然而令人惊奇的是，根据爱因斯坦的质能方程，即便是一张一元纸币，只要条件允许，也能成为同样危险的武器。光的速度为300 000千米每秒，即 $c = 3 \times 10^8$ 米每秒，而一张纸币的重量大约为 1 克，即 0.001 千克。因此，如果纸币完全转化为能量，将会释放出 $0.001 \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13}$ 焦耳的能量，甚至比第一颗原子弹爆炸所释放出的能量还要多一点。

在公式 $E = mc^2$ 发表十多年以后，爱因斯坦扩展了狭义相对论，将

牛顿的万有引力定律涵盖进来，这就是广义相对论。爱因斯坦和牛顿的理论之间一个关键区别就是当光接近像太阳一样质量巨大的物体时是否会发生弯曲。1919 年的日全食为科学家提供了一个检验理论的机会。英国知名天体物理学家亚瑟·爱丁顿爵士率领一队人通过测量证实了广义相对论的准确性。[13]

次年，爱丁顿在英国科学促进协会做了一次演讲，主题是太阳以及其他恒星何以持续闪耀。爱丁顿认为："恒星依赖于巨大的、我们未知的能量库。这一能量库中几乎只能是亚原子能量，我们知道，这种能量广泛存在于所有物质内。有时候我们会梦想有一天人类能够了解到释放这种能量的方法，从而让它为我们服务。"[14] 在演讲的结尾，爱丁顿预见道："如果到时人类能够自如地释放出这种亚原子能量来维持其巨大火炉的运转，大概我们也就更接近了控制这一潜在能量的梦想，只是不知道是用于谋求人类的福祉，还是用于人类的自我毁灭。"[15]

太阳何以持续闪耀

尽管汤姆孙提供了坚实的证据，证明原子内存在携带负电荷的微粒，但原子本身是中性的，因此原子内必定还存在带正电荷的微粒，从而和带负电荷的微粒相中和。最初，人们认为带正负电荷的微粒是均匀地分布在原子内，就像蓝莓葡萄干松饼上均匀分布着的蓝莓和葡萄干。但欧内斯特·卢瑟福通过实验发现，这些叫做质子的带正电荷的微粒是紧紧聚集在一起，并位于如今被称为原子核的位置上。

在爱丁顿发表关于太阳依赖于亚原子能量演讲的同年，卢瑟福猜想或许可以将一个电子和一个质子结合在一起，制造出一个不带电的微粒。12 年后，不带电的微粒——中子被发现了。该微粒帮助科学家弄清

了氦原子核的结构。氦原子的原子序数为 2，但其原子量为 4。原子序数为 2，说明其原子核中含有两个质子；而原子量为 4，则说明其原子核中必定包含两个中子。

在爱丁顿发表演讲的时代，人们知道，太阳主要由氢（71%）和氦（27%）构成。爱丁顿猜测亚原子能量有可能是通过氢原子核碰撞结合的方式产生的。

不过，这其中仍然存在很多理论障碍有待克服。四个氢原子核的原子量为 4，这和一个氦原子核的原子量相同，但四个氢原子核中包含四个质子，而一个氦原子核中则包含两个质子和两个中子。需要一种方式能使四个质子变化为两个质子和两个中子。而且四个氢原子核同时相撞的可能性也很低，就像四辆汽车同时相撞的可能性很低一样。尽管如此，四辆汽车的连环相撞却时有发生，即两辆车先撞在一起，后面的车来不及刹车，紧跟着就一头撞上。

另一个问题就是质子之间的相斥作用，前文已经讲过，这种静电力要比它们之间的万有引力强很多。不过，在高温（对应的是高速）情况下，质子有可能获得足以强过彼此之间静电力的能量。问题是太阳的温度似乎不足以引发这种可能性。

解决以上问题需要巧妙综合量子力学和统计力学中的某些概念，并利用大量新的实验数据。虽然太阳的平均温度不足以促使两个质子碰撞，但根据统计力学提供的气体分子速度分布函数，其中会有极小的区间，其温度会达到足以发生量子隧穿效应的程度。这使得质子碰撞，并释放出一个正电子使其中一个质子转变为中子。就像前文所说的四辆汽车连环相撞，核反应也会连环发生，科学家将之称为质子–质子链反应，

最终四个氢原子核将转化为一个氦原子核。[16]

在这一过程中，氢原子核的一小部分质量被转化为能量。氢的原子量为 1.007 94，氦的原子量为 4.002 6，而一个电子的质量大约为 0.000 55，因此氢原子核的原子量为 1.007 94 − 0.000 55 = 1.007 39，氦原子核的原子量为 4.002 6 −（2 × 0.000 55）= 4.001 5。于是在四个氢原子核转化为一个氦原子核的过程中所损失掉的质量为 4 × 1.007 39 − 4.001 5 = 0.028 06，平均每个原子核所损失的质量为 0.028 06/4 ≈ 0.007。

质子-质子链反应并非核聚变发生的唯一方式，但太阳当中大部分的热核聚变都属于这种情况。还有一种反应叫做碳氮氧循环，在这一过程中，碳、氮、氧三种元素既会相互转化，也会帮助从氢制造氦。该过程需要比质子-质子链反应更高的温度，因此在太阳中较少发生，但在温度更高的恒星中则更常见。[17]

雷霆万钧

我有时会猜想詹姆斯·邦德的创造者伊恩·弗莱明大概是对氢聚变的效率有所了解，毕竟他曾在英国最好的私立学校伊顿公学就读，不过此类内容应该不会出现在预科学校的课程里面。但不管怎样，詹姆斯·邦德没有被称为“7”，而是被称为“007”。当然伊恩·弗莱明选择这个编号或许与氢聚变的效率没有任何关系，而只是因为恰好如此而已。

不过从物理学层面来说，0.007 也必须要恰好如此——多一分不行，少一分也不行，这或许也是本书里最不寻常的一个数字了。其他数字都是普适常数。就我们所知，万有引力常数 G 即使在距离我们 100 亿光年远的星系中数值还是一样。阿伏伽德罗数代表 1 摩尔任何物质的分子

数，当然摩尔的定义就使得阿伏伽德罗数在不同物质之间不可能存在差异。不过，就算这些数字略有差异，大概也不是太要紧的事。然而如果 0.007 这个数字有一丝一毫的变化，世界恐怕是要天翻地覆了。热核聚变除了会将氢转化为氦以外，还会继续将氦转变为更重的元素，只是后者的效率要比前者低很多。这对我们来说，是件万幸的事。如果这些过程的效率太高的话，恒星的寿命就会大大缩短，或许会短到没有时间让生命得以产生和演化。

0.007 这一数字对热核聚变过程极其重要。质子-质子链反应的第一步是两个质子碰撞形成氢的同位素氘，氘的原子核中包含一个质子和一个中子，因为其中一个质子释放出一个正电子而转变为中子。如果氢聚变的效率低到 0.006，那么中子和质子便无法结合在一起，氘便无法形成，最终宇宙中除了氢以外别无他物。恒星仍然会存在，但不会成为创造万物的引擎，而只是由氢构成的巨大球体——在引力作用下收缩升温，放出光来，然后慢慢冷却死亡。

而如果氢聚变的效率高到 0.008，质子的碰撞结合则会变得太过容易。宇宙中所有的氢都会很快转变为氦或更重的元素，而没有了氢，便不会有水。我们可以想象在此种情况下，宇宙中或许会出现其他形式的生命，但一定和我们所知的一切大相径庭，而且他们铁定不同于我们。

注释

[1] 可参见 http://www.cowboylyrics.com/lyrics/davis-skeeter/the-end-of-the-world-10980.html（2011 年 1 月 6 日有效）。

[2] 可参见 http://www.famous quoteandauthors.com/authors/ogden_nash_quotes.html（2011 年 1 月 6 日有效）。

[3] 可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Fleming（2011 年 1 月 6 日有效）。

[4] 可参见 http://www. quotationspage. com/quote/33774. html（2011 年 1 月 6 日有效）。

[5] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Crookes_tube（2011 年 1 月 6 日有效）。

[6] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Wilhelm_Röntgen（2011 年 1 月 6 日有效）。

[7] 同上。

[8] 可参见 http://nobelprize. org/nobel_prizes/physics/laureates/1901/perspectives. html（2011 年 1 月 6 日有效）。

[9] S. Brandt, *The Harvest of a Century* (Oxford: Oxford University Press, 2009), 80。

[10] 可参见 http://nobelprize. org/nobel_prizes/peace/laureates/1962/#（2011 年 1 月 6 日有效）。

[11] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Crookes_tube（2011 年 1 月 6 日有效）。

[12] S. Brandt, *The Harvest of a Century* (Oxford: Oxford University Press, 2009), 41。

[13] F. W. Dyson, A. S. Eddington, and C. Davidson, "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* (1920): 332。

[14] S. Brandt, *The Harvest of a Century* (Oxford: Oxford University Press, 2009), 258。

[15] 同上。

[16] F. Levin, *Calibrating the Cosmos* (New York: Springer, 2006), 76 ~ 77。

[17] S. Brandt, *The Harvest of a Century* (Oxford: Oxford University Press, 2009), 259。



第11章 钱德拉塞卡极限

在 1835 年，哲学家奥古斯特·孔德试图探索一些从未有哲学家涉足的领域。此前，哲学家也曾试图定义人类智慧的边界，但他们把主要精力投在伦理、道德和宗教领域，努力寻找那些人类智慧无法解答的问题。孔德搜集了一系列他认为科学界永远无法解答的问题，其中一个就是确定恒星的构成。孔德认为科学界无法回答这一问题的想法其实并不是毫无理由。事实上，在 1838 年，弗里德里希·贝塞尔将会测算出恒星天鹅座 61 距离我们 10.4 光年，这个距离比太阳和地球之间的距离大 660 000倍，超过此前所有人的预期。显然要了解距离我们如此遥远的物体会是一个十分巨大的挑战。

幸好哲学家和科学家阅读的书籍和杂志通常并不相同，即便有所了解，孔德的预测无疑也会被罗伯特·本生[1]抛在一旁。本生是一位德国化学家，当时他正忙于研究含砷的有机化合物。对此类化合物的了解将会成为科学史上一个重要的里程碑，但这要一直等到大约 75 年以后，保罗·埃尔利希使用这些化合物研发出一种能够治愈梅毒的药物。在本生的时代，人们对此类化合物的了解仅限于它们十分危险。事实上，本生由于实验事故失去了一只眼睛，并由于砷中毒两次几乎丧命。痊愈之后，他认识到谨慎才是大勇，从此便离开了有机化学，开始转向研究一个更加安全的课题——加热在化学反应中的作用。这在后来导致了本生灯的发明，这一设备只要是踏足过化学试验室的学生应该都曾见过。

古斯塔夫·基尔霍夫是本生早期的学生之一，他们共同研究了各种元素受热发光时的光谱。他们将托马斯·杨光穿狭缝和牛顿棱镜分光的想法结合了起来，由此催生了科学史上最重要的工具之一——分光镜。他们使用本生灯将材料加热至白炽状态，而受热材料所发出的光穿过分光镜将一组彩色线条映照在屏幕上。随后他们发现这些彩色线条可以视为是一种化学指纹，因为每一种元素都有其独特的线条模式，即光谱。

分光镜被证明是一种十分有用的工具。基尔霍夫在使用分光镜分析阳光时，在其中发现了钠元素的光谱特征。由于地球的大气层中并不存在钠这种元素，而且在太阳和地球之间的真空中显然也没有这种物质，那么必然的结论是：钠元素必定存在于太阳之中。日后，人们利用这种技术对恒星的光线进行分析，从而确定了恒星的化学构成，而这一切距离孔德悲观的预测还不到 30 年的时间。不过，基尔霍夫的发现和名声也受到一些人的怀疑。他的银行顾问出于实用主义的考量问他："就算太阳上有黄金，如果我不能将它搬到地球上来，又有什么用呢?"不久之后，基尔霍夫因其研究在英国获奖，奖金即是英国的金币。基尔霍夫拿着这些金币找到他的银行顾问，借机说道："瞧，这就是太阳上的金子。"[2]

孔德在分光镜问世前两年就已经去世。虽然他对于恒星构成的看法是错误的，但他的主要思路是对的：宇宙中有些东西是科学永远无法解释的。有些系统，比如地球上的天气，对于各种微小的变化十分敏感，因此人类无法准确预测好几天后的天气。不过，问题在于，像孔德那样为某件事情贴上不可能的标签后，人们会甚至不愿意去尝试。因此更好的做法是像爱因斯坦那样，认为只要存在问题，就能找到答案，而第一步便是提出问题。[3]如果让我要猜的话，我想绝大部分儿童都会问以下三个（或其中几个）简单的问题。第一个就是"我从哪儿来"。多数孩子提出这一问题时，他们的父母都会措手不及。（我的父母也像多数父母一样只是笨嘴笨舌地说了一通。实际上，当时的解释并不令我满意，直到我十或十一岁时，他们才递给我一本极其枯燥的关于人类生殖系统的书。或许他们认为只要我对这一主题感到厌倦之后，便不会再去烦他们了。他们想得不错，和很多同代人一样，我也得以从各种不同渠道拼凑出整件事的面貌。）第二个和第三个问题则是第一个问题的变体，涉及的也是起源问题。孩子们完全沉浸在他们自己的世界之中，因此第一

个问题总是关于自身的来源。随着他们认识得越来越多，接下来的两个问题便跳出来了："世界从哪儿来？""一切从哪儿来？"爱因斯坦说得没错：这些简单的问题都是真正深刻的问题，它们驱动了许多最重要的科学进步。

当然，工具也和驱动力一样重要。在解答科学大问题时，本生和基尔霍夫的分光镜可谓功不可没。如果要我选出科学史上十大工具，我很难不把这件工具排在第一位，虽然像显微镜这样对人类健康产生重大影响的设备也不遑多让。这种十大某某的名单有其好处，比如我可能对建筑毫无兴趣（实际上也是如此），但如果我刚好在网上看到一个标题，写着最重要（最大或者最美）的十大建筑，我很可能会点开看一下。事实上，有这么一个十大名单，对于回答前面的第二个和第三个问题具有重要意义，那就是太阳系中最常见的十种元素。这个列表的发现同样要归功于分光镜，它不仅让我们得以确定太阳、太阳系甚至宇宙的构成，而且还能了解到其具体的构成比例。

元　　素	百分比（%）
氢	92.295
氦	7.548
氧	0.082
碳	0.048
氮	0.009
氖	0.008
镁	0.003
硅	0.003
铁	0.002
硫	0.002

这个列表清晰地表明，我们的地球能够形成是件多么不可思议的事情。事实上，聚集起任何一种物质的可能性就极其微弱，毕竟宇宙相当空旷，平均每五立方米空间中才有一个原子。虽然在引力和电磁力的作用下，物质能够聚集起来，但地球更加不可思议的地方在于，它并不只是氢和氦加上少量其他元素的组合。宇宙中几乎没什么重元素存在，但地球上却有很多此类物质，氧、铝、硅、钠、钾、钙以及铁等物质在地球上至少都跟氢一样常见。

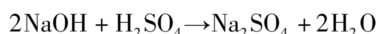
我们可以来看看各种元素在地球上的分布与在整个宇宙中的分布差异有多大。人体中包含 65% 的氧和 19% 的碳。以我为例，我体重 60 千克，因此包含 39 千克的氧和约 11 千克的碳。1 摩尔氧重 16 克，所以可计算出我体内含有 2438 摩尔的氧，即 1.47×10^{27} 个氧原子。如果物质在宇宙中都是均匀分布的，那么每 6250 立方米的空间中才会存在一个氧原子，也就是说要搜集到我体内这么多的氧原子，需要 9.19×10^{30} 立方米的空间。该立方体的边长为 2.09×10^{10} 米，比地球和月亮之间的距离还要长 54 倍。

这样说来，宇宙费尽了麻烦才在地球上聚集了那么多碳和氧，也使得本书的存在成为可能：为地球提供了足够的碳和氧来制造出作者，制造出读者，制造出可用的纸张。探索始于分光镜的发明，而结论则在近一个世纪之后由卡尔·萨根给出："我们都是由恒星物质构成。"[4] 而在这句话背后则隐含着一个被称钱德拉塞卡极限的东西。

平衡法则

化学反应涉及对化学键的拆解和重构，其中各种元素进行重新组合，构成新的化合物。用来记录这个过程的是类似簿记系统的化学方程式。

下面来介绍一个简单的化学反应例子，反应的双方为氢氧化钠和硫酸。（操作这一实验时一定要注意距离，因为反应会相当剧烈。）氢氧化钠的化学式为 NaOH，硫酸的化学式为 H_2SO_4，反应的方程式为：



$$2NaOH + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O$$

在以上方程式中，两个氢氧化钠分子和一个硫酸分子，生成一个硫酸钠（Na_2SO_4）分子和两个水分子。箭头表示反应发生的方向（反应前的物质位于箭头尾部，反应后的物质位于箭头指向的位置）。该反应是配平的，因为箭头两边所有元素的数量保持一致，两边都各有一个硫原子、两个钠原子、四个氢原子和六个氧原子。

不过，以上描述并不完整。就像在现实世界中，有些交易过程是在私底下完成的，“没有入账”。在这里，有一个关键的参与者——能量，并没有被提及。有些反应是吸热的，即需要能量来促成反应的发生。本书前面接触过的电解化合物以得到构成该化合物的原子便是此类反应。例如，为将水分解为其组成元素（氢和氧），需要用电为这一反应提供能量。水的电解方程式可以写成：



$$2H_2O + 能量 \rightarrow 2H_2 + O_2$$

要完整记录化学反应的过程，还需要具体列出所消耗的能量数值，但在此就不要求如此细致了。

其他反应则是放热的，即反应过程会产生能量。一个很好的例子就在汽车引擎当中，当乙烷（C_2H_6）和氧气在高温下混合燃烧，便会产生水和二氧化碳（我想大家一定很清楚二氧化碳在全球变暖中所扮演的作用）。如果把能量也包含进来，那么该反应的方程式为：

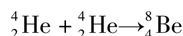


$$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O + 能量$$

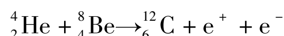
以上所有这些的关键在于化学反应会保留所有元素，保留每一个原子。这也就是炼金术士追求的点石成金注定不会成功的原因所在，他们手头的工具不过只是化学反应而已。若要进行能够改变原子种类的核反应，则需要拥有比炼金术士更高的科技水平，或更多的热量。前者一直到 20 世纪才成为可能，而后者则只存在于恒星的核心。

核合成

回答孩子提出的第一个深刻问题“我从哪儿来”通常始于对孩子出生前九个多月所发生事情的含糊描述，但如果缺少碳这种元素，所有的一切都无从谈起。碳和多数除了氢和氦（它们在宇宙大爆炸后不久就被创造出来）以外的元素一样，都是核合成（在恒星中频繁发生的元素创造过程）的产物。而制造出碳的具体反应叫做三氦过程，整个过程不仅像是同时发生三辆车的连环相撞，而且还是三辆一模一样的车，比如三辆 2006 款丰田花冠轿车。在配平核聚变反应时，并非像在化学反应中那样配平元素原子的种类和数量，而是配平原子序数（原子核中的质子数量）以及质量数（原子核中质子和中子的总数）。氦-4 中含有两个中子和两个质子，可用符号$^4_2$He 来表示。三氦过程中首先进行一个吸热反应，由两个氦原子合成一个铍原子，紧接着是一个放热反应，由铍原子再和一个氦原子合成一个碳原子。两个反应的方程式如下：



$$^4_2He + ^4_2He \rightarrow ^8_4Be$$



$$^4_2He + ^8_4Be \rightarrow ^{12}_6C + e^+ + e^-$$

第二个反应除了制造出碳原子以外，也制造出一个正电子（右边倒数第二项）和一个电子（右边最后一项）。两个反应所产生的净能量大约为 1.16×10^{-12}焦耳。这个数字并不大，并且三氦过程的发生频率也极低，远低于三辆丰田花冠轿车撞在一起的几率。更困难的是，这一过程需要高达 1 亿开尔文的高温才能驱动，而如此高的温度只有在非常非常大的恒星中心才有可能达到。不过，过去已经有过足够多的此类恒星，因此才使得在如今的宇宙中，碳的含量位居所有元素的第四位。

我们的宇宙富含氧和碳元素，而生成碳元素的三氦过程却是如此困难，这引发了一个简单而又宏大的问题。这也是反复困扰科学界和哲学界的大问题之一，可能不是小孩子能想到的。那就是，为何宇宙看上去经过了如此精心的安排，仿佛一切都为智慧生物的进化作好了准备呢?的确，我们已经见证了另外一个巧妙安排的例子，即氢聚变的效率。在 1952 年之前，甚至三氦过程存在的可能性都尚未被人类所知，然而天体物理学家弗雷德·霍伊尔通过类似逆向工程的方法非常笃定地推断出，这一过程不但必定是可能的，而且必定是存在的。他认为，人类的存在以及人类存在的方式均依赖于充足的碳。因此在任何核合成过程中，必定有一种能创造出碳的方式。这便要求存在某种三氦过程，不论这一过程的可能性有多么微弱，它都将发生。证明完毕。

然而故事并没有就此完结。正如氢聚变效率的巧妙设定使得人类（或地球上的生命）得以出现，碳原子也一样功不可没。碳原子的化学属性造就了我们这种生命形式的生化特性，而其核特性则使得碳能够大量存在，为生命的产生准备了材料。这些核特性不仅促成了生成碳所需的三氦过程，同时也能够防止“四氦过程”（碳原子与氦原子合成氧原子）发生得太过频繁而把碳耗尽。没错，我们是需要氧，但首先要先有碳才行。事实上，在大气中有大量氧气之前，地球上已经有生命存在

了。如果将碳原子转化为氧原子的过程更容易进行的话，最终将有更多可供呼吸的氧气，不过却没有生命来呼吸它。

对于各种核合成反应的发现是 20 世纪最伟大的科学成就之一，虽然它们得不到太多曝光的机会。至此，人类还欠缺的就是在地球上实现核合成的能力了。即使是最简单的核合成——氢合成氦的反应，也需要巨大的能量。在氢弹的爆炸中，人类已经能在地球上再现这一过程，但这需要利用原子弹爆炸来制造出所需的温度和压力。而这实在不是一种需要产业化的东西。我们能在实验室条件下实现核聚变，但尚不能以合理的成本实现。如果有朝一日，我们能够实现这一点，那么将足以创造出供人类无尽使用的清洁能源。但那些制造出更重元素的核反应则完全超出了我们的能力，因为那需要极高的温度和压力，只有真正巨大的恒星才会具备。

太阳为何依旧闪耀

如果再深入思考些的话，其实乡村歌曲中也未必都不能提出深刻的问题，只要我们略为放宽些标准。我们在探讨核聚变时回答了太阳何以闪耀的问题，那么太阳到底为何依旧闪耀呢？部分答案在于氢聚变的效率：太阳里面实在有太多太多的氢，而其聚变的效率又不是很高，因此要把这些氢用完，需要很长很长的时间。然而，由于太阳含有太多太多的氢，这些氢所施加的万有引力会非常非常强；又由于万有引力是一种吸引力，它会使所有氢向太阳的中心方向聚集，那么为何太阳不因此而发生塌缩呢？

我们知道，当气体温度升高时，其体积会膨胀。正是来源于氢聚变的向外的辐射压力和向内的引力之间的平衡才维持了太阳的均衡，达数

年、数百年、数千年、数百万年之久。但太阳并不会永世长存。引力是不可抗拒的力，一颗恒星为了持续闪耀，必须要能够保持其向外的压力以抗衡这种引力。那么，一颗恒星将内部的氢合成为氦，但事情就止于此吗?

正如前文所述，还存在其他形式的核聚变过程，不然碳便不可能被制造出来。然而，聚合氦要比聚合氢难得多。在聚合氢时，必须克服库仑势垒将氢原子拉得足够近。在前面章节中，我们已经介绍过，两个电子之间的静电力是它们之间万有引力的 10^{39} 倍。要克服这一静电力，需要极高的温度；而且电子克服库仑势垒的实际流程并非只是简单地让它们高速对撞在一起，而是通过一个更加精密的量子力学过程——量子隧穿效应。电子其实并非如我们通常想象的是种快速移动的微粒，因此量子隧穿效应才会发生。事实上，可以说没有人真正知道电子到底是什么；为了进行运算，对电子的最佳表述就是将其视为一种数学构造——概率波。电子在空间中并没有一个确切的位置，这一点不同于我们宏观世界里的一切。不论电子到底是什么，我们只能判定它们最可能的位置。事实上它们无处不在，温度越高，它们的位置越可能发生变化，比如变到库仑势垒的另一侧。

比氢更重的原子含有更多电子，因此它们之间的静电力就要大于氢原子之间的静电力。这也就意味着，需要更高的温度来使原子达到足够的速度，从而通过隧穿效应克服库仑势垒。获得此类高温的唯一方式就是更强的引力作用，而这一点不难发生。每当两个氢原子合成一个氦原子时，整体的原子数量就减少一个。当所有氢原子都合成为氦原子之后，其中只有很少的质量被转化为了能量（数字 0.007 代表了氢聚变的效率），但原子数量却只有原来的一半。引力作用会将这些原子压缩至一个更小的空间，从而进一步提高原子的温度。只要恒星一开始足够

大，这时就会有足够的氦制造足够的引力作用，提升足够的温度，于是氦聚变便可以开始了。

故事重复进行。当所有氦都完成聚变以后，恒星的质量几乎和之前一样，而原子数量则大幅减少了。引力作用将这些原子压缩至一个更小的空间，继续提升恒星的温度，当达到适当的条件时，便可以开始合成更重的原子。

不过，这一过程的快慢程度并不一样。氦合成为碳的过程要比氢合成为氦的过程快得多。这也解释了为何生命的产生需要如此长的时间，因为氢需要很长时间才能合成为氦，进而氦才能继续合成为碳，最终为生命的产生创造条件。同样，这也解释了为何生命有时间得以演化：一旦像地球这样一个拥有大量碳的星球围绕一个像太阳这样的恒星，氢聚变的效率就会让恒星长久稳定地运行。

事实上，一个真正巨大的恒星，比如质量达到太阳的 20 倍，它的生命周期就像一出情节越接近结尾越激烈的大戏。在此类恒星中，氢合成为氦需要大概 10 亿年的时间，而氦合成为碳和氧则只要大约 100 万年的时间。然后碳合成为氖和镁需要大约 10 万年，氧燃烧变成硅和硫需要 20 年，最后硅和硫变成铁则只需一周！各阶段的不同速率使整个恒星看上去像一个多层的棒棒糖：厚重的铁核外面包裹一层硅和硫，再向外延伸则是一层层温度越来越低，依次是氖和镁、碳和氧、氦以及表面的氢。

恒星接下来的命运是一个非常精彩的故事，而破解这个故事的是一位十分有趣的人——苏布拉马尼扬 · 钱德拉塞卡，朋友和同事则通常称呼他为钱德拉。

钱德拉塞卡

有些教授，比如艾萨克·牛顿，说实话糟糕透了，所以经常会面对空空如也的课堂。而有些教授，比如路德维希·波兹曼，则令人振奋，因而深受学生的喜爱。还有些教授充满神秘感，虽然才华横溢，却难于接近。我也曾有过一位这样的老师——角谷静夫，他在耶鲁大学教授数学分析课程。我想凡是上过大学的人应该都遇到过这么一位教授，不论专业是数学、历史还是文学。钱德拉塞卡也是这样一位老师，作为他的学生，卡尔·萨根日后回忆道：

> 当时，钱德拉在做一场学术报告。教室的三面墙上都有黑板，钱德拉开讲前，所有黑板上一个字也没有。在讲课的过程中，他写满了每一块黑板，方程式整整齐齐地排列起来，重要的地方并用框圈起来，俨然像要送去发表的论文一样。随着讲座接近尾声，钱德拉斜靠着讲桌，面向观众。当主持人请观众提问时，一个观众说道："钱德拉塞卡教授，我认为，在黑板上……我看看……第 8，不，第 11 行，我认为你有个符号写错了。"钱德拉完全无动于衷，不发一言，甚至没有回头看一眼那个方程。整个会场显露出尴尬的安静，过了一会，主持人开口："钱德拉塞卡教授，您要回答这个提问吗?"钱德拉依然没有回头，只是说："这不是问题，这是个陈述，而且是个错误的陈述。"[5]

这样的故事可能会给人留下一个冷漠而疏远的学者不关心学生的印象。这种人在各院系都见得到，特别是在顶级机构中，但钱德拉塞卡并非其中之一。在他事业的大部分时间里，他都居住在威斯康辛州的威廉

斯贝，因为那临近耶基斯天文台，上课则要前往芝加哥，即使有段时间课堂上不过只有两个学生而已。当时，州际公路尚未修建，两地之间的路程大约有 160 千米，但这样的奔波似乎是值得的。1957 年的诺贝尔物理学奖颁给了杨振宁和李政道，[6] 两人正是钱德拉塞卡的学生。

钱德拉塞卡本人也获得了诺贝尔奖，但一直要等到 1983 年。[7] 这是一个漫长的等待，要知道他获奖的研究始于他的青年时代！20 世纪 20 年代，天体物理学家已经了解到一颗叫做天狼星 B 的暗白色恒星（著名的天狼星的伴星）拥有高得惊人的密度，比太阳密度高出了 100 万倍之多。这一点让当时的天文学家困惑不已，因为原子不可能被挤成那个样子而依旧维持原子状态。达到此种密度只有一种可能，即电子不再依附在原子核周围，于是恒星的构成就从原子变成了正离子和外围密集的电子。正如在之前章节说过的，当电子之间的距离过于接近时，根据量子力学，它们之间会产生一种叫做电子简并压力的作用力。根据泡利不相容原理，两个微粒不可以具有完全相同的量子态；在这里，也就意味着其中一些电子会被迫进入一种非常高的能级，并因此获得极高的速度。这种作用力能支撑着恒星抗衡引力作用。一个典型的白矮星质量大概和太阳相同，但该质量却被压缩进一个地球般大小的空间之中。

1926 年，拉尔夫・福勒发现电子简并压力会让白矮星达到前所未闻的密度。[8] 作为一名极其聪明的学生（他不到 18 岁就已经开始阅读研究论文），钱德拉塞卡意识到福勒并没有考虑到当电子以极高速度运行时产生的相对论效应（图 17）。当钱德拉塞卡运用相对论修正福勒的研究时，他得出了一个完全出乎意料的惊人发现。钱德拉塞卡发现了白矮星（或任何简并态物质）的质量上限。

当时还是福勒博士生的钱德拉塞卡将自己的发现写成论文，题为

“理想白矮星的质量上限”。[9]这个上限取决于几个本书已经讨论过的普适常数，包括万有引力常数、光速、普朗克常数以及相应恒星中电子的平均分子量。如今普遍接受的钱德拉塞卡极限值大约为太阳质量的 1.4 倍。[10]

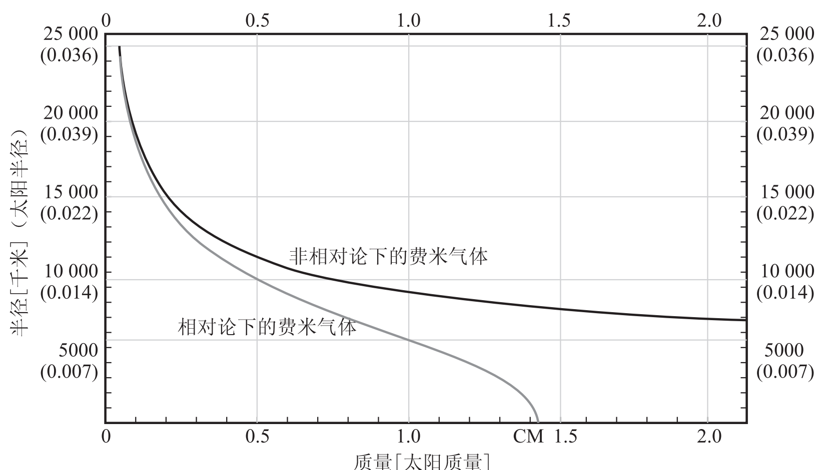


图 17　白矮星的质量-半径关系。费米气体是理想气体的量子力学版，CM 为钱德拉塞卡极限（制作者：AllenMcC.，Trex，Incnis Mrsi）

该结果是钱德拉塞卡在从印度到英国的轮船上得出的，当时他还不到 20 岁！[11]这个结果也令钱德拉塞卡陷入与当时最杰出的天体物理学家之一亚瑟・爱丁顿爵士的争论之中。该场争论将对钱德拉塞卡的事业产生深远影响。在当时，最重要的天体物理学难题之一就是确定恒星的生命周期。爱丁顿也将他事业的大部分精力投入到解决该问题上。他认为白矮星是所有恒星最终的命运，不管这些恒星原先有多么巨大。两人的争论始于 1935 年 1 月英国皇家天文学会举办的一次会议上。两位都在会上提交了论文，爱丁顿并受邀在会上讲几句话，而这些话相当犀利。

> 福勒采用普通公式［解决了该问题］；而钱德拉塞卡运用过去五年来开始被接受的相对论公式，表明一颗质量大于特定极限值 M 的恒星仍然是理想气体，并永远无法冷却下来。恒星会一直不断地辐射，一直不断地收缩，直到有一天，我猜想，当恒星半径缩减为只有几千米时，引力足够强大到得以完全压制住辐射。此时，恒星才终于平静下来。
>
> 钱德拉塞卡博士之前已经得出了该结论，但在他最新的论文中，他又不厌其烦地重复了一遍。在和他讨论这一问题时，我不能不得出结论，他所做的不过是利用他所谓的相对论简并公式进行的反证法。或许有各种意外因素可能会拯救一颗恒星，但我希望有更充分的证据。我认为自然的法则不会允许恒星以如此荒唐的方式演化！
>
> 如果有人将相对论简并公式的数学推导视为理所当然，那么他得出的结论并没有差错［在此爱丁顿给了钱德拉塞卡一小点认可］。但是我们必须更深入地了解该公式的物理学依据，而这不无可疑之处。该公式源自对相对论力学和非相对论量子理论的结合，我不认为此种结合所生出的后代是合法的。现有公式部分考虑到了相对论，而如果将其补充完全，进行相对论修正，那么我们依然可以依靠“普通”公式。[12]

爱丁顿没有质疑钱德拉塞卡推导过程的正确性，而是暗示其犯了根本的物理学错误，才会得出如此荒唐的结论。钱德拉塞克从会上离开后十分沮丧，毕竟爱丁顿是当时该领域成名的大师，但他并未就此放弃。他开始和许多当时知名的物理学家交流，试图确认他和爱丁顿究竟谁作出的物理学分析是正确的。而物理学家基本都站在了钱德拉塞卡一边。著名物理学家鲁道夫·佩尔斯对此回忆道：“钱德拉塞卡在相对论下使

用费米-狄拉克统计时明显是正确的，我认识的物理学家无一不是这么认为，他们也对于爱丁顿否认明显的事实而感到震惊，毕竟爱丁顿本人还写过一本相对论的著名教材。因此，关键不在于问题本身，而在于与爱丁顿意见相左。”[13]

对钱德拉塞卡来说，与爱丁顿意见相左并不意味着要与他开战。在争论期间，两人仍维持着密切的个人关系，并且不是肥皂剧里的虚情假意。对于这段时期，钱德拉塞卡回忆道：“这件事从未影响我对爱丁顿的尊重……我也从未觉得我们会因此就变成陌路人……那年春天［在英国皇家天文学会的会议之后］，我们还一起骑自行车出去，爱丁顿还带我去看了温布尔登网球赛。”[14] 事实上，这段友谊成了钱德拉塞卡的某种羁绊。他本可借助世界顶级物理学家们的支持击败爱丁顿。相反，钱德拉塞卡并没有这么做，而是选择搁置这一争论，并开始将研究注意力从白矮星转向其他问题，以避免陷朋友于尴尬。当 1944 年爱丁顿去世时，钱德拉塞卡给出了以下评价：

> 我相信所有认识爱丁顿的人都会认为他是一个品德高尚的人。我不相信他会对任何人怀有刻薄的想法。人们敢于与他在科学问题上产生争议，因为你很清楚，他不会因此就对你本人作出不好的评判。[15]

不过，钱德拉塞卡并未彻底放弃这项工作。当脉冲星在 20 世纪 60 年代被发现后，钱德拉塞卡重新捡起了他在 30 年前的研究方向，继续研究星体的结构及其运作方式。1983 年，钱德拉塞卡和另外一位物理学家分享了诺贝尔物理学奖。尽管他在整个研究生涯中对天体物理学的诸多课题均作出了巨大贡献，但该奖项主要还是奖励他于 1930 年夏天在轮船上所做的工作。钱德拉塞卡曾经这样描述他的一生：“1930 年，我

离开印度前往英国。1936 年，返回印度迎娶一位等了我六年的姑娘。然后我们来到芝加哥，从此幸福地生活于此。”[16]

莫扎特 5 岁时就开始作曲，12 岁的少年便能赢得奥运金牌，而亚历山大大帝 20 岁时便征服了世界。所有这些都是了不起的成就，但更加令我敬畏的则是这样一位学生的能力，大学只上了两年，便能吸收那个时代最精妙的理论，并应用这些理论破解了恒星的秘密。物理学家雷斯·约斯特对此有十分精彩的表述：“在我们的世界，存在一个秘密团体，他们所做的工作能够超越时间和空间的限制，钱德拉塞卡便是其中一员。正是这个天才群体编织和构建了我们文化的骨架。”[17]

钱德拉塞卡所做工作的核心是，当一颗恒星的质量大于钱德拉塞卡极限时，它不会停止在白矮星阶段，而是会在超新星爆炸中，将一直到铁的所有重元素抛向宇宙。事实上，由于爆炸非常猛烈，更多核聚变将会发生，从而创造出比铁更重的元素。而之后的一些放射性衰变则会生成一些较轻的元素，从而进一步丰富元素周期表上的元素种类。

飞机有一个起飞速度，超过这个速度飞机才能升空。而钱德拉塞卡极限并非只是一个为巨大恒星敲响丧钟的数字，它也是行星以及生命得以出现的起飞速度。

注释

[1] 和很多科学家（艺术家或商人）一样，本生也是一个工作狂。当专注于某个问题时，他会拒绝外人的打扰。甚至于，据说在他结婚那天，他还跑去实验室，锁上门进行研究。当朋友前来找人时，他要求他们离开，让自己安心工作。你一定会好奇这样的故事是不是杜撰出来的，不过古往今来的确有很多人在结婚庆典当天会临阵退缩。不论如何，没有证据表明本生曾结过婚。

[2] S. Singh, *Big Bang*: *The Origins of the Universe* (New York: Harper-Collins, 2004), 237。

[3] 可参见 http://www.pbs.org/wgbh/nova/transcripts/2311eins.html（2011 年 1 月 2 日有效）。

[4] 可参见 http://www.goodreads.com/author/quotes/10538.Carl_Sagan（2011 年 1 月 22 日有效）。

[5] K. C. Wali, *Chandra* (Chicago: University of Chicago Press, 1991), 6。

[6] 可参见 http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/（2011 年 1 月 2 日有效）。该站点收录了全部诺贝尔物理学奖的名单，按照年份排列。点击每一个年份便可看到详细内容，包括研究概要、获奖致词以及获奖者的生平简介等。

[7] 同上。

[8] K. C. Wali, *Chandra* (Chicago: University of Chicago Press, 1991), 62。

[9] 可参见 http://www.ias.ac.in/jarch/jaa/15/115－116.pdf（2011 年 1 月 22 日有效）。

[10] 可参见 http://scienceworld.wolfram.com/physics/ChandrasekharLimit.html（2011 年 1 月 22 日有效）。

[11] K. C. Wali, *Chandra* (Chicago: University of Chicago Press, 1991), 76。

[12] 同上，第 125～126 页。

[13] 同上，第 135 页。

[14] 同上，第 138 页。

[15] 同上，第 140 页。

[16] 同上，第 10 页。

[17] 同上，第 12 页。



第12章

哈勃常数

1758 年，法国天文学家夏尔·梅西耶将望远镜对向太空，希望能够第一个记录下 1682 年大彗星的回归，这次回归是由英国天文学家爱德蒙·哈雷所预言的。不过梅西耶未能如愿成为首个观察到该彗星的人，荣誉归于一位恰好在正确的时间望向正确的位置的法国农民。当梅西耶最终看到该彗星时，他完全被它迷住了，并由此确立了其终生事业——搜寻彗星。梅西耶也的确发现了非常多的彗星，但这些并非确立他在天文学中历史地位的主要成就。让梅西耶闻名于世的并非他记录下的彗星，而是他记录下的妨碍他观察彗星的物体。

在梅西耶的时代，一颗遥远的彗星在望远镜中就是一个模糊的物体，就像今天的低倍望远镜所看到的那样。问题是，梅西耶观测到，彗星并不是出现在望远镜中唯一的模糊物体。彗星与其他模糊物体的主要分别在于彗星是移动的，其他物体则不会。梅西耶于是开始记录其他模糊物体的位置，以免将它们误认为彗星。最终他所记录下的其他模糊物体多达上百个。

至于这些其他模糊物体到底是什么，科学界存在很多种推测。卓越的法国数学家和物理学家皮埃尔-西蒙·拉普拉斯认为它们是非常遥远的气体云团。事实上，如今用来称呼此类物体的 nebula（星云）一词就来自于拉丁语中的“云”。哲学家伊曼努尔·康德则提出了一种不同的理论，他认为星云是数量庞大的恒星的集群，由于太过遥远，望远镜无法区分出其中的每一颗星体。康德将之称为“岛宇宙”。

这些其他模糊物体引起了英国兄妹天文学家威廉·赫歇尔和卡罗琳·赫歇尔的注意，两人在 18 世纪晚期位居望远镜制造的领先地位。他们通过自己制作的一架巨大望远镜搜集到许多数据，并出版了《一千个新星云和星团的目录》。[1]同时，两人也首次实际证实了康德的“岛宇

宙”之一确实是一个庞大星群的集合，这就是我们太阳系所处的银河系。威廉·赫歇尔实际上绘制了一份银河系的星图，并将太阳系置于靠近中心的位置。然而赫歇尔的望远镜还是无法确定星云到底为何物，该问题的答案需要等到本生和基尔霍夫发现光谱之后才能最终给出。

1863 年，英国天文学家威廉·哈金斯爵士利用他的八英寸望远镜上安装的分光镜，研究了太阳以外其他恒星的光谱。它们的光谱与地球上已知元素的光谱一样由众多线条构成。次年，哈金斯决定观测天龙座中的猫眼星云。他吃惊地发现其光谱只有一条明亮的线条。由此可知，星云果然如拉普拉斯所预测的那样，是十分遥远的气体云团！之后不久，哈金斯又观测了仙女座的光谱，它的光谱则像恒星的光谱一样包含众多线条。如此，星云则又果然如康德所设想的那样，是由引力相系的恒星集群！

天文学家在了解星云为何物后，下一个问题自然就是：它们在哪里？它们是属于银河系，从而为银河系即整个宇宙的看法再添例证，还是位于银河系外？对此的回答将会对人类迄今所提出的一些重大问题产生重大影响。

周光关系

最初测量恒星距离的方式是利用视差法（图 18）。要大概了解视差的概念，请想象在正午时刻观察远处一只钟表的分针。如果人从左边看这只钟表，其分针将落在 12 和 1 之间。人移动到钟表右边再看，其分针将落在 11 和 12 之间。只要测量出人移动的距离（基线距离）以及观察钟表的夹角（视差角），便可以通过三角学计算出人离钟表的距离。

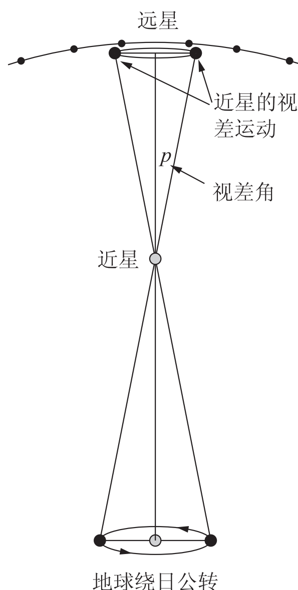


图 18　由于恒星都非常遥远，视差角非常小，因而一个天体的距离（以秒差距测量）是视差值（以角秒测量）的倒数，即 $d = 1/p$。1 秒差距相当于 206 265 个天文单位，合 3. 26 光年（制作者：Booyabazooka）

不过，这种方法也存在局限性。即便现在人们将望远镜放到了人造卫星上，基线距离最多也只能是地球公转轨道上最远两点之间的距离（即地球在 1 月 4 日的近日点与在 7 月 4 日的远日点之间的距离）。有时候，一颗恒星的距离太过遥远，视差角就会过小而无法测量。在实践上，视差法只能用来测算距离地球几百光年内的恒星。这也意味着，宇宙中还存在一些距离我们数千光年，甚至更加遥远的恒星。

对于视差法局限性的首次重大突破来自于亨丽爱塔・勒维特，她于 1892 年毕业于美国马萨诸塞州的拉德克里夫学院。如今该学院的毕业

生，比如新近成为最高法院大法官的艾蕾娜·卡根，会有非常多优越的工作机会，但在 1892 年，为女性提供的工作机会并不多。因此，勒维特只能在哈佛大学天文台担任计算员（computer）的工作，当时“computer”一词指的还是担任计算工作的人。她负责测量感光胶片上恒星的亮度，每周可拿到丰厚的 10.5 美金的工资。[2]

虽然大部分恒星均会保持相同的亮度，可长达百万年甚至数亿年之久，但所谓的变星则会周期性改变其亮度。这一现象早在 1638 年就由天文学家约翰内斯·霍尔沃德[3]发现了，他观察到恒星蒭藁增二在一个持续 11 个月的周期中发生亮度变化。虽然有些恒星的亮度变化是由于其他星体的遮挡而造成周期性的亮度变暗，但造父变星（由于首颗被发现的是仙王座造父一而得名）则是由于自身气体动力学机制而呈现出周期性脉动，这一点是由亚瑟·爱丁顿爵士首先阐明的。[4]各种变星，特别是造父变星，引起了勒维特的注意。她注意到恒星越明亮，其光变周期便越长。1908 年，勒维特将初步研究结果发表在《哈佛大学天文台年报》上。[5]

这份研究并未引起天文学界的关注，但勒维特并没有气馁。她继续研究这类变星，并于 1912 年发表了如今我们所知的周光关系。基于对1777颗恒星的研究，她得出如下结论：“两条直线可以把代表亮度最大值和最小值的点分别串联起来，说明变星的亮度和其周期之间存在一种简单关系。”[6]

这项划时代的发现，与勒维特之前的那篇研究一样，也没能激起太大的反响。勒维特继续在哈佛天文台工作，并在 1921 年被天文台台长哈罗·沙普利提拔成为部门主任，然而癌症却随后在当年夺走了她的生命。勒维特的一位天文台同事索伦·贝利在葬礼上这样称赞她：“她能

够看到每一个人的优秀和可爱之处，她的天性如此阳光，每一天对她来说都变得美丽而充实。”[7]勒维特离世后不久，她对天文学所作的贡献便开始得到应有的评价。

勒维特所发现的周光关系为天文学家提供了测量造父变星距离的方法，进而为测量距离远超过视差法极限的遥远星体提供了方法。整个思路可以借用汽车车头灯的例子说明。大部分汽车车头灯的亮度都是稳定的。又由于我们已经知道在距离很近时汽车车头灯的亮度如何，于是通过比较车头灯的明暗便可判断出汽车的远近。当然，我们并不会把这作为过马路时唯一的判定标准；即使夜晚在没有红绿灯的区域，也有一些其他信号可供我们参考，比如声音等。但不管怎样，以上原则是有效的。

以天文学的语言来说，汽车车头灯这种稳定的亮度提供了一个可以确定其他灯光亮度的标准烛光。勒维特所发现的周光关系显示只要确定了一颗造父变星的亮度，便可将造父变星作为参照的标准烛光（类似于测量一只汽车车头灯的亮度，就了解了所有车头灯的亮度）。无需再去一一测量其他变星的亮度，因为它们的光变周期是很容易确定的，这样根据周光关系便可计算出相应的亮度。

亮度会随着物体距离的远近而变化，而这种变化是可预测的。所以只要能通过视差法测量出一颗造父变星的距离，便可以知道该恒星的距离和亮度的关系。而对于其他的造父变星，我们可以通过周光关系来推导出其亮度，然后再通过亮度来推导出其距离。在勒维特过世一年后，埃希纳·赫茨普龙便确定出了银河系中一系列造父变星的距离，[8]不过他很可能并不是受到勒维特发现的推动，而是独立探索得出的。

这其中不能否认哈罗·沙普利的功劳：他认识到该技术的价值，并且广泛运用周光关系来确定银河系的尺寸和形状。然而，沙普利也有其不堪之处，他的所作所为更像是一位政客，而非科学家。1926 年，瑞典数学家哥斯塔·米塔格-莱弗勒联络沙普利商讨推荐勒维特作为诺贝尔奖候选人的可能性。[9] 米塔格-莱弗勒当时并不知道勒维特已经去世，而诺贝尔奖则是只颁发给在世的科学家的，因此她不符合奖项要求。但沙普利接下来的作为令人不齿：他不是对勒维特艰苦工作的认可来得太迟而感到惋惜，反而试图劝说米塔格-莱弗勒，真正的功劳并不在于勒维特发现周光关系，而在于沙普利运用周光关系确定银河系的大小。

星云的世界

不过，星云的位置问题仍然没有解决。1920 年，科学界曾努力尝试解决这一问题，并在美国国家科学院的会议上引发了一场著名争论，沙普利和天文学家希伯·柯蒂斯就宇宙的尺度问题展开了辩论。这场大论战不仅是观点的论战，也是两种行事风格的论战，一边沙普利生猛直接，另一边柯蒂斯则彬彬有礼。沙普利认为银河系就是整个宇宙，而柯蒂斯则认为有些星云位于银河系之外。我真希望当时要有录像就好了，这场论战如果能完整记录下来，那一定精彩至极。但不那么精彩的是垫场部分，那是个关于钩虫的报告，在听众看来是又臭又长。爱因斯坦也感到不耐烦，向另一位观众开玩笑道："我刚刚发现了一个关于无尽时间的新理论。"[10] 这场日后被称为世纪大辩论的争论最终以平局收场，因为两人都无法证明各自的立场。沙普利难以证明银河系之外没有星云，而柯蒂斯的立场似乎相对比较容易证明，只是缺少数据的支持。

为该问题最终画上句号的是本章的主人公，20 世纪最伟大的天文

学家之一爱德文·哈勃。哈勃长相英俊，身材魁梧，曾是一名优秀的运动员，又曾获得罗德奖学金，“一战”时还是美军的陆军少校。1919年，他加入了加利福尼亚州的威尔逊山天文台。之后，哈勃娶了一位成功银行家的漂亮女儿格雷斯·伯克为妻。全世界有几十亿人，根据概率论，其中总有几个会事事遂愿，爱德文·哈勃无疑是其中之一。

哈勃最为人知的是他的两项主要成就，其一就是为世纪大辩论画上句号。在 1922 ~ 1923 年间，哈勃在当时所谓仙女座星云中发现了几颗造父变星。通过运用赫茨普龙的计算结果和周光关系，他发现这些恒星的距离要远远超出银河系，所以仙女座星云只能是位于银河系之外的恒星集群。因此，如今该星云被称为仙女座星系，而且哈勃及以后许多天文学家的研究更进一步证明宇宙中包含数以亿计的类似星系。哈勃在对待勒维特的问题上做得也比沙普利更加得体；他十分认可周光关系的重要性以及勒维特作为发现者的地位，并认为勒维特原本应为此而获得诺贝尔奖。

但是和视差法一样，利用造父变星的测量方法也有其局限性。不过，哈勃及其同事借鉴 19 世纪物理学中另一项伟大发现，证明了宇宙之大。

多普勒效应

这一发现即多普勒效应，你可能从警用测速器或天气预报中对此会有所了解。这一效应首先由奥地利物理学家克里斯蒂安·多普勒发现。[11]他发现随着火车的经过，其汽笛声会发生声音上的变化。最初证实这一效应是通过物理史上一个颇具诗意的实验。在 18 世纪 40 年代，像示波器这类能够准确测量声音频率的设备尚未面世，当时对听觉最敏

锐的装置就是专业音乐家的耳朵了。为了证明多普勒效应，音乐家被安排在火车上弹奏同一个音符，同时其他一些音乐家，最好是拥有绝对音高感的，则被安排在铁轨边，负责确认列车经过时他们所听到音符的音高。不出意外，当火车接近时，铁轨边音乐家所听到的音高会高于火车上音乐家所弹奏的音高，而当火车远离时，情况则刚好相反。

这其中的数学问题其实只是简单的代数运算了。设想你站在铁轨上，一列火车以 25 米每秒的速度正向你驶来。为了警告你，司机鸣笛示意，假定汽笛声的音高恰好为中央 C，其频率为 260 赫兹。这里的关键数值是声音的速度和频率。在海平面上，音速为 340 米每秒，而中央 C 的波长为 1.31 米（音速除以频率）。然而，由于火车在运行，你实际听到的音符并不是中央 C，而是用声音的净速度除以波长得出的频率所对应的音符。因此，当火车接近时，你会听到（340 米每秒 + 25 米每秒）/1.31 米，即 279 赫兹的音符；而当火车远离时，你则会听到（340 米每秒 − 25 米每秒）/1.31 米，即 240 赫兹的音符。用音乐术语来说，火车接近时你听到的是降 D 音，而火车远离时你听到的是 B 音。我们可以将接收到的频率（F_o）和发出的频率（F_e）与火车速度（V）和音速（v）的关系写成以下公式（当火车接近时，速度 V 的符号为负号）：

$$F_o/F_e = 1 - V/v$$

只要波的传播速度远远低于光速，比如火车汽笛声，那么以上公式能很好地描述多普勒效应。但如果我们所面对的是一种电磁波源（电磁波以光速传播），并且波源本身也以极高速度运行的话，根据爱因斯坦的狭义相对论，以上公式就需要作一些修改了。

狭义相对论

我无法成为一名物理学家的（众多）征兆之一就是我在理解狭义相对论关键的时间膨胀和长度收缩概念时存在极大困难。我一生都对物理学充满向往，但我从未能像理解伟大的数学思想一样透彻地理解伟大的物理学思想。多数人都会时不时发现对某些东西无法完全理解；在理解的过程中，我们一会儿清楚，一会儿迷糊。爱因斯坦的狭义相对论对我来说就是这样一个让我纠结了 50 年（自从首次接触以来）的理论。我阅读了大量相关的科普作品，也读过众多完全数学化的教材，却始终从未能很好地把握它——直到大卫·麦凯伊提出下面的解释，这是所有我已知解释中最简单也最直截了当的一个。

如果你经常乘坐火车的话，可能有过这样的体验。邻近的轨道上也有一列火车，透过窗口，你能看到那辆火车上的乘客。突然间，火车开始移动，你眼中看到另一列火车在移动。然而，除非你有明显的参照，否则你无法判断到底是哪列火车在动，这种参照可以是你所在火车的突然晃动，也可以是铁路或树木等明显静止的参照物。

相对论涉及的是两个相互看来都以匀速运动的“参照系”，比如两列火车。那么到底哪列火车在运动？答案是两者都在动！狭义相对论数学解释中的关键部分就是，一个人不论是在哪列火车中，当他以米为单位测量同一段的距离或以秒为单位测量同一段的时间时，他总是会得出相同的数值。为理解其中的原理，请想象两列相邻的火车，你位于其中一列。你手中有两把相同的米尺，并将其中一把交给相邻火车上的人。如果你们都测量外面世界的同一段距离，你用你手中的米尺，他用他手中的米尺，你们都会得出相同的数值。这时纠结于谁手中的米尺是真

的，或者谁在运动谁没有，都是没有实际意义的；你无法作出判断，因为两人看到彼此都在移动。

假设你做出如下举动：打开车窗，将米尺、钟表及手电筒交给对面火车中的人（而他也恰好开着窗）。那是一只特殊的手电筒，打开时，会发射出一个单独的光子。两列火车以相同的速度相向而行，你测量出这个速度为 v 米每秒，对面火车中的人所测量出的你远离的速度同样为 v 米每秒。这就是相对论的基本设定，各人手上的米尺和钟表没有“正确”与“不正确”之分，因此每个人测量所得的数据都是相同的，否则的话，肯定是有米尺或钟表是“不准确”的。

现在再假设，当另一列火车上的人与你交汇时，他将手电筒对准所在火车的车顶，并打开开关，很快从中发射出的一个光子便击中了车顶。你可以用三个点来创建一个直角三角形（图 19）。点 A 是当那个人打开手电筒开关时你和他所在的位置。点 C 为光子击中车顶的位置。由

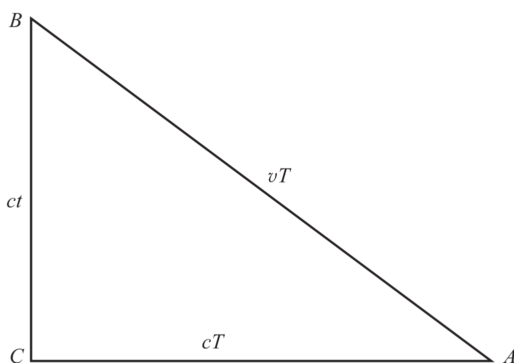


图 19　理解这个示例的关键是，将两列火车想象为重合在一条轨道上。其他对于时间膨胀的简单推论可见：http：//zh. wikipedia. org/wiki/时间膨胀

于列车沿着轨道运行，从光子发射到击中车顶的时刻，点 C 已经沿着铁轨运行了一段距离。令点 B 为点 C 正下方的一点，并与点 A 构成一个直角三角形，这样 AC 为该直角三角形的斜边。根据毕达哥拉斯定理，我们可知：$AC^2 = AB^2 + BC^2$。

距离等于速度乘以时间，而光速 c 是恒定的（就像火车的速度），不论是由你来测量，还是由另一列火车上的人来测量，结果都一样。那么在你看来，从对方手电筒开关打开到光子击中点 C 一共过去了多少时间呢？你可以测量距离，并通过距离 = 速度 × 时间的公式来计算出时间。用 T 来代表这个时间，则 $AC = cT$，由于 AC 即光子运行的距离，始于点 A，终于点 C。而由于火车的运行速度为 v，从点 A 运行至点 B，因此 $AB = vT$。

在那列火车上的人看来，从手电筒打开到光子击中点 C 的时间为 t，而光子从列车地板运行到车顶的距离为 BC，通过速度乘以时间的方法可以计算出距离为 ct。你计算出的距离也是一样，因为三角形的边 BC 和 AB 是相互垂直的，而且在 AB 方向上，你俩的米尺都不会受运动的影响。我们将这些来自你的参照系的数据套进毕达哥拉斯定理中，即：

$$AC^2 = AB^2 + BC^2$$

$$(cT)^2 = (vT)^2 + (ct)^2$$

从而可得出：

$$t = T\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

这便是著名的时间膨胀效应：那列火车上的人的钟表记录下的经过

时间要少于你的钟表所记录下的时间。注意，在此我们甚至不需要钟表的存在，我们是直接通过“距离 = 速度 × 时间”的公式来计算出时间。

如果我们用 L 来代表你测量的 AB 之间的距离，用 l 来代表那个人所测量出的 AB 的距离，其中 $L = vT$，而 $l = vt$，因为双方所看到的列车速度均为相同的数值 v。因此 $v = L/T = l/t$，$l =$ （t/T） L。用刚才所得出 t/T 的值代入其中便得到以下方程：

$$l = L\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

这便是同样著名的菲茨杰拉德收缩：那个人所测量出的距离小于你所测量出的距离。

狭义相对论与多普勒效应

狭义相对论会影响到多普勒效应，因为当物体以接近光速的速度运行时，洛伦兹因子（前面公式中的平方根部分）将变得非常大；当速度较小时，其数值基本上等同于 1。这时接收到的频率与发射出的频率的比就会变成如下这样：

$$F_o/F_e = \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

如果 $V = 0.9c$（即光源以九成光速运行），而 F_e 等于 6.5×10^{14} 赫兹（表示所发射出的光为蓝色），那么接收到的光线的频率根据光源的远离或接近，分别为 1.49×10^{14} 赫兹（红外线）或 2.83×10^{15} 赫兹（远紫外

线）。因此，当光源逐渐远离我们时，其颜色会发生红移现象，而当光源逐渐接近我们时，其颜色则会发生蓝移现象。

多普勒并未预见到现代生活中许多对于多普勒效应的应用，甚至包括对投手投出快球速度的测量，但他的如下预测则确实像一记漂亮的本垒打：

> 几乎可以确定的是，在不久的将来，天文学家会将其作为一种十分好用的手段，来测量恒星的运行和距离。对于那些距离太过遥远而视差夹角过小的恒星来说，测量和确认工作原来是毫无希望的。[12]

正是通过利用多普勒效应，我们才能够回答孩子们常会提出的第三个大问题——一切都从哪儿来？

膨胀的宇宙

将造父变星作为标准烛光，人们发现许多星系均位于银河系以外。随着望远镜越来越大，所能看到的东西就越多。其中许多星云并不存在造父变星，或者不存在可以观测得到的造父变星。因此，人类还需要寻找另外确定距离的方式。而多普勒效应，因其指出了速度和频率的关系，正是合适之选。

当一个物体沿直线移动时，观察者可以通过两个数据来描述其速度。设想一辆汽车正以 90 千米每小时的速度沿北偏东 60 度的方向行驶。一个小时后，汽车行驶了 90 千米的距离。假设汽车的行驶路线是一个直角三角形的斜边，那么其南北边长为 45 千米，东西边长为 $90\frac{\sqrt{3}}{2}\approx 78$

千米。物理学家将这一过程称为速度的分解。当一个物体在太空中移动时，按照多普勒效应，我们可以确定物体沿观察者视线方向的速度，这一速度分量被称为视向速度。

通过结合多普勒效应和光谱仪，天文学家能够发现恒星（或星系）的谱线特征是如何变化的，进而可以确定恒星（或星系）的视向速度。确定了星云构成的英国天文学家威廉·哈金斯在 1872 年首次通过这种方法确定了天狼星的视向速度。他在氢元素的谱线中发现了轻微的红移现象，通过仔细的测量，最终确定天狼星在以约 47 千米每秒的视向速度逐渐远离我们。[13]

在随后的几十年间，大量恒星的视向速度被测算出来，有些在逐渐接近我们，有些则在远离。这并未使天文学家感到吃惊，毕竟如果你下午走在一条繁华的街道上，必然有些人会走近你，有些人会远离你。除非发生什么特别的事情，比如一位大明星突然现身，致使大部分民众全部朝一个方向移动；否则的话，人们远离你或走近你的可能性是相同的，只是有些会走得快些，有些会走得慢些。

同样，天文学家也试图确定星云的视向速度。由于许多星云的谱线十分密集，基本成了一个连续的条带，所以很难分辨出每条单独的谱线。而无法分辨出单独的谱线，便也无法确认与特定元素相关的谱线特征。因此，早期确认的视向速度只局限于恒星。通常这些速度都在数十千米每秒的范围内。

到了 20 世纪，科技进步使得分辨星云谱线成为可能。一位年轻的美国天文学家维斯托·斯里弗借此测算了仙女座星云的视向速度。尽管斯里弗的测算早于哈勃利用造父变星确定仙女座星云的距离，但斯里弗

也得出了一个惊人的结果：仙女座星云正以高达 300 千米每秒（千分之一光速）的速度向地球靠近。随后，斯里弗继续进行星云视向速度的测量工作，并在 1914 年美国天文学会的会议上给出了一系列星云的视向速度，赢得了与会成员起立鼓掌的殊荣。有趣的是，大部分星云的视向速度都是负值，即远离银河系。这些星云是真的在远离银河系，还是宇宙深处有什么东西在吸引它们？这一点当时人们无从得知。

斯里弗在 1914 年的会议上作报告时，哈勃也是出席者之一。哈勃已经利用周光关系确定了一系列包含造父变星的星系的距离。利用斯里弗的数据，并结合自己的数据，他就可以确定这些星系的视向速度。下面表格里的数据就是哈勃当时进行原创性分析时可用的数据。其中百万秒差距是用来描述遥远距离（如星系之间距离）的测量单位，大约相当于 320 万光年。

与地球之间的距离（百万秒差距）	**远离速度**（千米每秒）
0.032	170
0.034	290
0.214	-130
0.263	-70
0.275	-185
0.275	-220
0.45	200
0.5	290
0.5	270
0.63	200

（续）

与地球之间的距离（百万秒差距）	**远离速度**（千米每秒）
0. 8	300
0. 9	-30
0. 9	650
0. 9	150
0. 9	500
1	920
1. 1	450
1. 1	500
1. 4	500
1. 7	960
2	500
2	850
2	800
2	1090

哈勃注意到（可能有些读者也注意到了），随着与地球距离的增加，其远离速度也在增加。他将这些数据放进直角坐标系中，发现这些数据几乎均落在一条直线上。在统计学中有一项技术是用来确定所谓回归直线，即一条最接近一系列数据点的直线。在这个例子中，如果用 x 来代表距离，y 来代表远离的速度，那么最靠近这些数据点的直线方程为$y = -41 + 454x$。

统计学中同样也有一种方式，可以衡量数据与一条直线的接近程

度，称为相关系数。如果一系列数据能够完美拟合一条直线中，并直线具有正斜率，那么其相关系数为 1。如果数据完美拟合一条直线，而直线具有负斜率，则其相关系数为 −1。如果数据点基本上是零乱的，那么其相关系数为 0。而对于以上这些数据，相关系数为 0.78，说明数据很好地拟合一条具有正斜率的直线。

然而，哈勃同时发现所有负值的远离速度，均来自于相对较近的星系。我们现在知道原因在于：星系在引力作用下群聚在一起，成为星系团，而银河系附近的星系均属于一个叫做本星系群的星系团。因此，是引力作用导致负值的远离速度。

哈勃持续扩充着他的数据库。随着他获取到更加遥远的星系的数据，他开始深信星系的远离速度与星系的距离之间存在一种简单关系。这种关系如今被称为哈勃定律，其表达式为：$V = H_0 D$，其中 D 代表该星系的距离（单位为百万秒差距），V 代表远离速度（单位为千米每秒），H_0为哈勃常数。尽管在该表达式中，H_0的单位为千米每秒每百万秒差距，但我们也可以以千米为单位来表达 D，这样 H_0的单位变为每秒。目前对于 H_0最好的一个估算是 2010 年通过哈勃空间望远镜（你知道是以谁命名的）而得出的。H_0值大约为 71 千米每秒每百万秒差距，或2.3×10^{-18}每秒。

那么这一奇妙发现的解释是什么呢？什么样的宇宙模型会导致星系越远而其远离地球的速度也越快呢？另外，根据爱因斯坦的广义相对论，宇宙是均匀分布的，不存在特殊之地。而自从哥白尼以来，我们已经知道地球并非宇宙的中心，因此这些星系一定不只是远离地球，它们也一定远离彼此。

广义相对论的爱因斯坦场方程给出了一个可能的解答，即宇宙本身在膨胀，星系则随着膨胀的空间而逐渐远离彼此。星系间的空间越大，膨胀的幅度就越大，因此距离更远的星系彼此远离的速度也更快。

另外，通过哈勃定律，我们还可以回答以下问题：可见宇宙到底有多大？之所以使用“可见宇宙”的说法，是因为如果有东西的远离速度超过光速，我们便无法观测到。当然，如果它发出的信息能以超光速传播，那就另当别论，不过到时数不胜数的物理学理论就要改写了。我们很容易计算出，一个星系要距离我们多远才能达到超过光速的远离速度。通过公式 $V = H_0 D$，令 $V = 300\ 000$ 千米每秒，$H_0 = 71$ 千米每秒每百万秒差距，可得出 $D = 300\ 000/71 \approx 4\ 225$ 百万秒差距，即 138 亿光年。

可见宇宙的大小

在第 9 章中，我们创建了一个宇宙的比例模型，其中用新买的柚子（现在已经下肚了）来代表太阳，这时 1 光年距离约合 1060 千米。那么银河系就有点像是草坪上的旋转喷头喷水的样子，中间有一个核心，并从核心处伸出许多旋臂。太阳系位于其中一根旋臂末端的位置。银河系的直径大约为 10 万光年。缩小到我们的模型，从太阳系跨越到银河系的另一端大概 1 亿千米之远。在现实中，如果太阳、水星和地球形成一条直线，并且水星位于太阳和地球之间，那么地球和水星之间的距离就大约为 1 亿千米。

银河系属于本星系群的一部分。本星系群的直径大约为 1000 万光年，其质心大约位于银河系和巨大的仙女座星系之间（之前被称为 M31，即梅西耶列表上的第三十一号其他模糊物体），两者相距大约 250 万光年。据此可以估算出银河系到本星系群边缘的距离大约为 400 万光

年。在我们的模型中，该距离大概为 42 亿千米。如果太阳、地球和海王星形成一条直线，而且太阳位于地球和海王星之间，并且海王星处于近日点，那么地球和海王星之间的距离恰好为 42 亿千米。

本星系群又是一个叫作室女座超星系团的一部分。室女座超星系团中包含超过 100 个星系群，而本星系群距离该星系团中最远的星系群大约有 6000 万光年之遥。在我们的模型中，要表现这种距离，大约要 640 亿千米，大约是光运行两天半所经过的距离。

而在可见宇宙中，还存在着数百万个像室女座超星系团这样的超星系团。人类最大的望远镜能够观测到接近 140 亿光年的距离，这已经接近宇宙大爆炸的时间点。在我们的模型中，这一距离对应的则大约是 1.5 光年。到了 20 世纪 90 年代早期，人类认识的太阳系已经扩展到了奥尔特云，这一圈云团包含了大量彗星核，距离地球大约 1 光年。奥尔特云仍然受到太阳的引力牵引，不过我们的模型还要比奥尔特云的距离更远一半，大约要到与最近恒星距离的三分之一。

140 亿光年代表了可见宇宙的尽头。超出这一距离，如果哈勃定律仍然有效的话，那里的远离速度将会超过光速，因此也无法从那里传回任何信息。那里或许正举办一场热闹的派对，但我们是收不到邀请函了。

宇宙在膨胀，遥远的星系在其中就仿佛大海中漂浮的碎屑，因此远离速度能够超过光速也没有什么矛盾之处。远离速度并非真实的速度，因为星系的红移现象不仅取决于多普勒效应，同时空间本身也在膨胀，而且在远离我们的地方膨胀速度更快。不管怎样，我都希望自己能尽可能活得久一些，亲眼见证某一天科学家能回答这一问题：在哈勃定律限定的界限以外是否还有别的东西，抑或我们能看到的就是宇宙的全部？

注释

[1] 可参见 http://www. jstor. org/pss/106639（2011 年 1 月 25 日有效）。JSTOR 是世界最大的科学出版物的数据库之一。通过这个链接可以免费阅读论文的首页，但要想阅读全文，则需要通过组织或自己购买阅读和下载权限。

[2] 自从在高中时期读了梭罗的《瓦尔登湖》以后，我就对不同时代的货币购买力十分感兴趣。梭罗仅以大概 28 美元的开支过了 9 个月的时间。在写下“丰厚”一词后，我决定了解一下在 1892 年，10. 5 美元到底能买些什么东西。当时，肉类大约是每磅 7 ~ 10 美分，面包是每根 5 美分。从中可以看出物价大概上涨了四五十倍，因此勒维特的工资换算成今天的数值大约为一年 25 000 美元。在 25 岁以上工薪收入者中，这大概位于中间水平。根据维基百科，“在所有 25 岁以上的工薪收入群体中，超过 42% 的人群收入低于25 000美元”。虽然算不上丰厚（特别是在波士顿地区），但也不会让人捉襟见肘。可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Personal_income_in_the_United_States（2011 年 1 月 23 日有效）。

[3] A. M. Lancaster, “The Discovery of the Sun Spots”, *Appleton's Popular Science Monthly*, September (1897), 683（2011 年 1 月 25 日有效）。这本书可以在谷歌图书中通过搜索“Jean Holward”找到，要注意忽略网页反复提示的搜索词“Jean Howard”。

[4] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Cepheid_variable（2011 年 1 月 25 日有效）。

[5] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Henrietta_Swan_Leavitt（2011 年 1 月 25 日有效）。页面上还有一幅勒维特的照片，她身着当时流行的上浆的白色褶边上衣。

[6] H. Leavitt, “1777 Variables in the Magellanic Clouds,” *Annals of Harvard College Observatory* LX（IV）(1908), 87 ~ 110。

[7] G. Johnson, *Miss Leavitt's Stars: The Untold Story of the Woman Who Discovered How to Measure the Universe* (New York: W. W. Norton & Company, 2005), 13。

[8] G. Christianson, *Edwin Hubble: Mariner of the Nebulae* (New York: Farrar, Strauss, Giroux, 1995), 144。

[9] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Henrietta_Swan_Leavitt（2011 年 1 月 25 日有效）。

[10] G. Christianson, *Edwin Hubble: Mariner of the Nebulae* (New York: Farrar, Strauss, Giroux, 1995), 141。

[11] 可参见 http://www-groups. dcs. st-and. ac. uk/ ~ history/Biographies/Doppler. html（2011

年 1 月 25 日有效)。
[12] 同上。
[13] J. Holberg, *Sirius: Brightest Diamond in the Sky* (Berlin: Praxis Publishing, 2006), 91。



第13章 欧 米 伽

在本书的最后一章介绍描述宇宙终极命运的常数可以说是恰如其分。这不仅是因为欧米伽（Ω）是希腊字母中的最后一个，也是因为一旦欧米伽的数值确定后，我们便能确定到底我们所在的宇宙是会不断膨胀下去，还是会收缩乃至重生。当然，作为一名数学家，我很欣赏对称性，因此一本书若以万有引力开篇而以欧米伽终结的话，看起来也挺不错的。

今天的大部分人，或者在任何并非完全糟糕透顶的时代的人，都是以当下为中心的，他们相信虽然当前的时代并不完美，但至少要好过以前的时代。我便是其中之一。我喜欢网络、有线电视、中餐外卖、无痛牙科以及航空旅行，尽管我有点怀念过去到机场直接登机即可。同样，我也惊异于人类对于宇宙的丰富知识，以及在最近一段短时间内人类所新增的大量知识。我们的知识如此丰富，我们探索和运用知识的工具如此强大，很难想象如果缺少了这些知识和工具，有人能做成或做对任何事情。

爱因斯坦广义相对论

人们对于爱因斯坦广义相对论的普遍印象之一是，该理论十分艰深，曾经只有十几个人能够理解它。事实上，当爱丁顿被人问到他如何看待人们说的只有三个人理解该理论的说法时，据说他反问道，谁是那第三个人。[1]而威尔逊山天文台的台长乔治·埃勒里·海耳则为这种说法进一步推波助澜，他曾说过：“相对论的复杂性完全超出了我的理解范围。”[2]

然而，此一时彼一时，诺贝尔物理学奖获得者、《宇宙最初三分钟》的作者史蒂文·温伯格对此持不同意见，他认为：“只有十几个人能够理解爱因斯坦广义相对论的说法从来就不是事实。即便果真如此，这只

能证明受因斯坦的失败，而非其卓越。”[3]广义相对论如今已经成为物理学课程的标准内容，这显然说明尽管该理论十分艰深，但爱因斯坦同时代的多数物理学家还是能够掌握它。

不过，作为广义相对论数学核心的爱因斯坦场方程对于外行人来说确实是一块难啃的骨头。一个网站将它概述为：一组包含 16 个变量的非线性双曲线型-椭圆型耦合偏微分方程。[4]必须说这是一块难啃的骨头再加上一碗难喝的汤，不过却是一顿十分健康的饮食，提供给相关专业的大三大四学生享用。概述中的一些术语还好理解，但另一些就需要掌握微积分的知识。不过即使对微积分一无所知，也可以对爱因斯坦场方程建立一些基本的认识。

首先，这些方程并非多数人所熟悉的那种常见的方程，比如 $2x + 5 = 7$，它的解是数字。这些方程描述的是在不同地点和不同时间下某些参数的变化率（所以称为“偏微分方程”），因而这些方程的解是函数，而非数字。“双曲线型-椭圆型”描述的是一种特定类型的偏微分方程，就像“一元二次方程”是描述一种特定类型的单变量方程一样。

“耦合”只是表明各种变量常会出现在同一个方程中。例如，在以下两个方程中，变量 x 和 y 便没有耦合。

$$2x + 5 = 7$$

$$3y - 1 = 8$$

而在以下方程中，变量 x 和变量 y 则相耦合。

$$2x + y = 5$$

$$7x - 2y = 1$$

任何熟悉高中代数的人都清楚，前面两个没有耦合关系的方程可以分别求解，而对于后面两个存在耦合关系的方程，则需要将两个方程综合起来求解，比如运用一种叫做消元法的代数技巧。耦合方程基本上总会比非耦合方程更难求解。

最后，线性方程就是像 $2x + 5 = 7$ 或 $2x + y = 5$ 这样的方程，其中所有变量均以原样示人；没有幂，不涉及诸如对数之类的函数。$x^3 + 5x = 18$ 这样的方程就是非线性方程。基本上，非线性方程总会比线性方程更难求解。

爱因斯坦时代的高年级大学生对于理解一般的非线性双曲线型-椭圆型耦合偏微分方程应该不会有特别的困难。然而使爱因斯坦场方程与众不同的原因在于它所描述现象的普遍性，以及推导出这些方程所需的深刻的洞察力。

当然，在我看来，要欣赏爱因斯坦场方程的简洁精美并不需要了解上述这些内容。爱因斯坦场方程可以简单写成如下样子：

$$G_{\mu v} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu v}$$

等式右边的 G 为万有引力常数、c 为光速。其他符号则为张量，是简单记录大量信息的浓缩方式。μ 和 v 的数值为从 0 到 3 的整数，0 代表时间坐标 ct（之所以时间 t 要乘以光速 c 是出于某种技术原因），1 到 3 则代表三个空间坐标。四个坐标合起来可以描述一个具体的时空点，包括具体空间（通过坐标 1 到 3）和具体时间（通过坐标 0）。整个方程实际上包括 16 个单独的方程，分别对应 μ 和 v 的 16 种数值组合 00，01，…，

23，33。由于这些组合中存在一些重复，因此最终可以缩减为 6 个方程。

可能的宇宙

几乎所有数学老师在指导学生解应用题时都有过这样的经历：学生表示解方程不难，难的是列方程。爱因斯坦场方程则情况不同：这道宇宙“应用题”的方程已经列出来了，问题在于求解这些方程，以此来描述宇宙。广义相对论发表后，有些人就试图解出这些方程，不过这个过程并不顺畅。

首位尝试求解这些方程的便是爱因斯坦自己，毕竟他是了解这些方程究竟是什么意思的第一人。广义相对论理论发表于 1916 年，当时哈勃还没有证明银河系以外还存在其他星系，更不用说发现其他星系日渐远离的事实。当时对于宇宙的普遍看法是，宇宙作为一个整体是静态、无变化的。因此，爱因斯坦试图找到一个静态不变的解。他也的确找到了一个解，但这个解对应的并非一个静态不变的宇宙，而是一个膨胀或收缩的宇宙。

怎么办呢？爱因斯坦确信他的方程是正确的，因为将其应用到太阳系时所得到的结果都无误，而在更大的尺度上，一定哪里出了错。因此，爱因斯坦在场方程中加入了一个“修正系数”，来获得一个与静态不变的宇宙相对应的解。该系数的加入使得爱因斯坦场方程从之前简洁精美的

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

变为不那么简洁但依旧精美的

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

新增加的部分是宇宙学常数 Λ 和一个张量的积，该张量是用来计算切向量之间的距离和角度，借此人们可以计算出距离以及该张量所描述的空间是什么样的。宇宙学常数在这里的效果就是平衡原先求得的解当中预示的宇宙膨胀或收缩的恼人（对爱因斯坦而言）趋势。物理学（可能其他领域也是如此）的理论是要“符合实际”的，人们创建的理论要符合所认知的实际情况，而在 1916 年，爱因斯坦所知道的宇宙就是静态不变的。

爱因斯坦的解并非这些方程的唯一解。荷兰天文学家威廉・德西特很快也求出了另一个解。[5] 但很不幸，和爱因斯坦最初的解一样，德西特的解也带有一些不符合物理学的特征。

简单来说，德西特所设想的宇宙中完全没有任何质量。这一点并不像看上去错得那么离谱，我们在前几章已经介绍过的，宇宙中实际包含的物质很少，平均每 5 立方米的空间中只有 1 个原子。我们所在的区域可能显得充满了物质，但考虑以地球为中心、直径为 1 光年的一个球体，其密度大概只有每立方毫米 1 个原子，十分接近于真空状态。并且相对来说，这还是块处于“爆满”状态的区域。德西特对于宇宙空空如也的设想在其竞争者看来并不符合物理学，但归根结底这其实是个实事求是的描述。尽管如此，这种设想并没有得到太多欢迎。在德西特所设想的宇宙中，第二个明显“问题”则是，钟表在距离地球非常遥远的地方走得要比在地球上慢一些，它使得来自遥远星系的光线产生红移。当时哈勃定律尚未发现，德西特和爱丁顿两人因而担心光线红移会被“错误”地用远离速度来解释。毫不奇怪，爱因斯坦对于德西特的设想不以

为然，表示这在他看来讲不通（要知道，爱因斯坦当时还不知道银河系外还有其他星系存在）。德西特强调斯里弗测算的恒星远离速度佐证了其模型的正确性。（对此我有个疑问：德西特的宇宙中根本就没有物体，何来物体的远离速度能佐证德西特的解呢？我完全无法想象有人会在某个数学会议上进行如此论证。我猜，诸如此类东西会使得宇宙学会议比数学会议更具娱乐性吧。）

史上最大争论

自打哥白尼与天主教会争论太阳系的性质开始，天文学中各种大而激烈的论战似乎特别多。如果说哈罗·沙普利和希伯·柯蒂斯关于银河系是否就是整个宇宙的争论被称为世纪大辩论的话，那么 20 世纪中期关于宇宙起源的争论则理所当然应该被冠以史上最大争论的头衔。

关于宇宙的起源，事实上只存在两种可能性：一种是宇宙起源于某个时间点（宇宙大爆炸理论），另一种是宇宙自古以来就一直如此（稳恒态宇宙论）。不过，科学的主要特征之一就是所有理论必须要符合实际，爱德文·哈勃已经证明大部分星系都在远离地球，并且这种远离遵照哈勃定律 $V = H_0D$。我们在此有必要为哈勃澄清一下，哈勃原本的公式为 $V = KD$，后来人们为了对哈勃表示敬意，于是将 K 改为了 H_0。事实上，在数学和科学领域，一般认为迫不及待地以自己的名字为某样东西命名称不上得体；如果一项发现足够重要，科学界自然会为科学家做这件事。比如，虽然我们总是说爱因斯坦广义相对论，但实际上爱因斯坦并没有傲慢得这么称呼自己的理论。在数学和科学领域，我所知的唯一一个操之过急的人便是莱昂哈德·欧拉，他花了很多精力在自然对数的底数 e 上。一些史学家认为他之所以将其命名为 e，是因为 e 是其姓

（Euler）的首个字母。

那么现在就让我们仔细审视一下关于宇宙起源问题的这两个理论吧。

宇宙大爆炸理论

在 20 世纪 20 年代早期，爱因斯坦场方程有三个解。其一是爱因斯坦那个没有宇宙学常数的最初解，对应的宇宙或者膨胀或者收缩。其二是爱因斯坦添加相应宇宙学常数后的解，对应的静态宇宙符合当时人们所了解的事实。其三便是德西特的解，对应的宇宙中不含物质，而且在远离地球的位置会由于时间膨胀而出现红移现象。

第四个解则来自于乔治·勒梅特，这是个非常了不起的人，拥有丰富多彩的人生经历。他不仅是一位才华横溢的物理学家，在“一战”期间还是一名炮兵军官，曾因英勇无畏而受到表彰，后来又成为一名天主教牧师。正如前文所述，由于爱因斯坦场方程十分艰深，所以爱因斯坦和德西特没能穷尽其所有可能的解也并不令人意外。勒梅特为爱因斯坦场方程（其中包含宇宙学常数）找到的解不仅描述了一个膨胀的宇宙，而且还提供了一种对哈勃定律的数学推导。他发表的论文标题很长“一个质量恒定而半径膨胀的均质宇宙可以解释银河系外星云的视向速度”。[6]该论文也通过观测到的数据，首次给出了哈勃常数的数值。然而，在物理学界，在其他领域也是如此，当你远离该领域的中心时，你发表的论文很难得到人们的注意。而且该论文又是发表在一份不知名的比利时期刊上，这大概是因为当时勒梅特还只是一位不知名的比利时天文学教授。

令人惊奇的是，一位同样参加过“一战”的俄国数学家亚历山大·弗里德曼也独立发展出了相同的解，而且比勒梅特早了五年之久。但是在 20 世纪 20 年代，物理学突飞猛进成果层出不穷，虽然弗里德曼的论文发表在著名的《物理学杂志》上，但现在回想起来，他在公关方面却犯下一大失误。他将论文简单命名为“论一个拥有负常曲率空间的世界的可能性”,[7] 但他的解实际上涵盖了全部三种可能性（正常曲率、负常曲率及零曲率，分别对应的空间就像球体、马鞍和纸张的表面）。或许爱因斯坦没有看到弗里德曼的论文，或许他虽然看到了，却认为不值得花时间去阅读。不管怎样，爱因斯坦并没有读到这篇论文。现在看来，弗里德曼真应该将论文命名为“对爱因斯坦场方程的解”，这样大概就会引起爱因斯坦的注意吧！

弗里德曼最终也未能引起爱因斯坦的注意，1925 年，他在克里米亚休假斯间死于一场伤寒。而勒梅特则在 1927 年最终引起了爱因斯坦的注意。不过那时哈勃的大量研究尚未被人们接受，因此仍然持静态宇宙观的爱因斯坦并未立刻被勒梅特的论文所打动。他认为勒梅特的数学运算虽然是正确的，但其物理学分析却非常糟糕。[8] 虽然爱因斯坦的反应对勒梅特是种打击，但他并没有气馁，而是继续发展他的理论。哈勃的数据明显为勒梅特带来了极大的鼓舞，同时，勒梅特也从爱丁顿那里得到了坚定的支持。爱丁顿于 1930 年在《皇家天文学会月报》上发表了一篇很长的评论文章，从而将勒梅特的理论推至了物理界的中心和前沿。认可最终到来了，爱丁顿将勒梅特的理论形容为一个“卓越的解决方案”，解决了用物理学描述宇宙的难题。这也为勒梅特带来了一次在伦敦做学术报告的机会。正是在这个场合，勒梅特提出了宇宙是由原初的一个点逐渐膨胀而来的思想，他将原初的点称为“原初原子”。爱因斯坦最终也被勒梅特的理论征服了。当勒梅特前去加利福尼亚州，向爱

因斯坦展示他的成果时，据说爱因斯坦曾起身鼓掌，说道："这是我听过的对宇宙最美丽也最令人满意的解释了。"[9]

天主教会也十分欣赏勒梅特的发现。他们怎么会不欣赏呢？不仅是因为发现者是一名牧师，更是因为当物理学家进一步推论勒梅特的理论时，他们意识到在很久很久以前，如今这些远离的星系一定是从某个时刻从极小的空间开始发散的。当物质和能量被释放出来时，宇宙便诞生了。在一段短暂的时间内，宇宙的温度非常之高，甚至连原子都无法在这种条件下形成，因而宇宙就是纯粹的能量。梵蒂冈急切地将这一切归功于上帝，因为在《创世记》中写道："上帝说：'要有光！'就有了光。"[10]从在 1600 年将布鲁诺送上火刑架到在 21 世纪资助天体生物学会议，梵蒂冈走过了一条长长的进化之路。

你是否觉得将整个宇宙塞进一个比乒乓球还小得多的空间里的理论难以令人信服？我也是。太阳的史瓦西半径大约为 3 千米，而一个常规的星系中包含数亿倍甚至数万亿倍于太阳的质量，整个宇宙则包含数以亿计甚至数以万亿计的星系。宇宙大爆炸理论要求所有这一切全部塞进一个比无比微小的、比氢原子还要小得多的空间里去。作为一名数学家，我能轻松想象无穷维空间，因为我知道这一切不过只是数学构造而已。但是将所有一切塞进一个无比微小的空间里去？对于这个问题，我想我能够采取奥威尔式的双重思想。我能接受它，因为它是目前为止有关宇宙起源的最佳理论，专家是这么说的。如果我读过这个理论的数学推演（我必须惭愧地承认我没有读过），我应该更易于接受它。但作为一个出门准备的东西都会挤爆行李箱的人，我从常人的视角来看是怎么都无法相信的。怎么能把所有东西全装进这么小的空间里去呢？让我无法理解的并非宇宙大爆炸或者随后发生的事情，我只是没办法想象那么大的质量如何装进一个无穷小的空间里去。如果有人提出这样一个理

论，将现在的宇宙完全装进太阳系大小的空间里去，然后开始爆炸膨胀。这尽管仍旧难以置信，但至少容易接受得多（至少对我来说是如此）。

我猜想，“大爆炸”一词的创造者、著名的天文学家弗雷德·霍伊尔对于这一点也是存在疑问的，因为他甚至甘愿牺牲物理学中最被推崇的一条定律，以试图提出一个他认为更加靠谱的理论。

稳恒态宇宙论

或许弗雷德·霍伊尔、托马斯·戈尔德以及赫尔曼·比昂迪也像我一样不擅长为旅行准备行李，他们都为宇宙大爆炸理论中的某些内容困惑不已。不过，如果你打算提出一个竞争理论的话，你必须要接受已经被实验证明的所有一切，这就意味着哈勃的红移现象需要得到解释。弗里茨·兹威基曾提出一种理论认为，红移现象其实并不意味着远离速度。一种可能的解释是“光线老化”：光线在从遥远星系射向地球的途中丧失了部分能量，可能是由于光线与物质的相互作用所致。[11] 另一种理论则是由爱德华·米尔恩提出的，他认为宇宙中充满了各种以随机速度（在随机方向）运动的星系，而其中以高速运行的星系更可能距离地球十分遥远。[12]

但这两种思想均被抛弃了，霍伊尔、戈尔德和比昂迪必须要提出一种能够解释哈勃定律和宇宙膨胀现象的理论。为创建一个永远看上去一样的宇宙，消除宇宙大爆炸的必要性，他们需要让宇宙能够持续产生新的恒星和星系来替代那些远得我们再也无法观测到的恒星和星系。这就意味着必须舍弃物质守恒定律，同时必须创造出新的物质。不过，根据该理论的计算，实际需要创造的新物质是出奇得少，因为整个宇宙实在

是太空旷了。这种持续不断的创造非常接近凭空创造，虽然它所需的只是在每个立方米的空间内每隔 10 亿年创造一个新的氢原子。[13]

但是怎样证实或证伪这样一个理论呢？显然，我们无法持续观察一个完全空空如也的 1 立方米的空间长达 10 亿年的时间，以见证氢原子凭空出现的神奇瞬间。另外还存在一个问题，根据该理论，宇宙不仅需要创造氢原子，同时也需要不时创造一些氘、氦以及锂原子，因为恒星的核合成无法制造出我们所观测到的如此大量的此类物质。该理论十分诱人，因为它假想出了一个热爱对称性的人所喜爱的宇宙，这个宇宙在质量、空间和时间上均具有各向同性和均质性。也就是说，它看上去完全一样，不管你是望向何方，也不管你是位于何处。然而该理论同时又是丑陋的，因为它不仅打破了作为物理学基础且实践证明一直有效的物质守恒定律，而且它还要求以准确的量和比例创造出合适的元素。

得奖的是……

毫不意外，得奖者我们都知道了，就是宇宙大爆炸理论。它的最终胜出有几个原因。首先，宇宙大爆炸理论成功预测了大爆炸的高温冷却残留下的一个温度（图 20）。其次，宇宙大爆炸的基本设定能成功解释一些物质大量存在的事实，而稳恒态宇宙论则需要额外设定来解释这一点。最后，稳恒态宇宙论需要整个宇宙在时时刻刻都看上去一模一样，然而在 20 世纪 60 年代后期，人类对于距离地球十分遥远的类星体和脉冲星的发现都证明宇宙并非时时刻刻都是同一个样子的。1972 年，史蒂文 · 温伯格在一场演讲中为稳恒态宇宙论盖棺定论，不过他的语气却不无颂扬："在所有的宇宙学理论中，稳恒态模型作出了明确的预测，因而人们利用手头有限的观察证据便能推翻它。"[14]

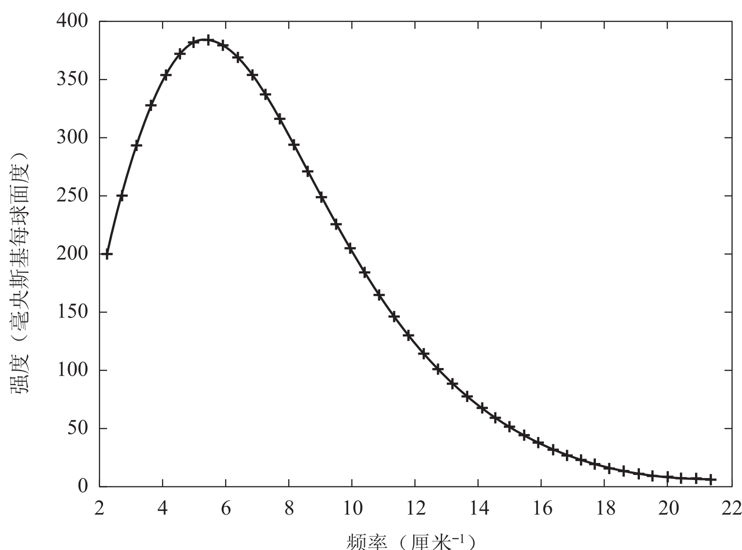


图 20　根据宇宙背景探测者（COBE）的测量结果，宇宙微波背景辐射谱非常精确地符合温度为 2.726 ±0.010 开尔文的黑体辐射谱（有关黑体和黑体辐射公式，参见第 8 章）（制作者：Quantum Doughnut）

弗里德曼的解、临界密度以及欧米伽

弗里德曼对于爱因斯坦场方程的解尽管在发表时未能引起爱因斯坦的注意，但它仍然在关于宇宙密度的讨论中占据重要位置。求解的过程已经远远超出了本书的范围，而且我也不太确信自己所受的数学训练是否能够完全领会这个过程，不过重要的还是结果。如果假定弗里德曼的解确实被证实了，即宇宙会具有正、负以及零曲率，那么我们完全不用投入那么多精力去寻找临界密度的数值，以确定宇宙的终极命运了。实际上，随后的数学运算非常简单，或许一年级的代数老师可以以此作为考试题目。

弗里德曼依据的爱因斯坦场方程是含有宇宙学常数的：

$$G_{\mu v} + \Lambda g_{\mu v} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu v}$$

其中，μ 和 v 的数值分别取 0、1、2、3，可以将其想象为一个四行四列的表格。弗里德曼选取的方程是当 μ 和 v 的数值均为 0 时的方程。我想他一定是经过大量工作，才将该方程简化成了以下形式：

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \Lambda \frac{c^2}{3}$$

其中 H、G 和 c 我们都很熟悉了，分别代表哈勃常数、万有引力常数和光速。Λ 为宇宙学常数，ρ 为宇宙的平均密度；a 是个时间函数，称为宇宙标度因子，不过为方便起见可以将其对应现今时期的值定义为 1。弗里德曼进一步通过设定 $k = 0$（后来的经验证明该值似乎就等于零）和 $\Lambda = 0$ 来简化公式。于是以上公式可以简化为：

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

通过以上公式，可轻松求出 ρ 的解，临界密度 $\rho = 3H^2/8\pi G$；如果我们将最新的 H 和 G 的数值套进公式里去，会得出一个大约每立方米 5 个氢原子的临界密度值。这一数值是如此小，人们的直觉会是这种密度所产生的引力一定非常小，小到几乎可以忽略不计。但事实上，这个数值已经足够大。这个密度就是临界密度，也就是当宇宙的形状是平直的，既不会膨胀也不会收缩时的密度，通常简写为 ρ_c 。

欧米伽就是一个简单的分数，分子为宇宙的实际密度，分母为临界

密度，即 $\Omega = \rho/\rho_c$ 。因此，对弗里德曼来说，Ω 值的大小将会告诉我们究竟宇宙是会坍缩（$\Omega > 1$），还是会膨胀（$\Omega < 1$）。

暗物质、辐射以及宇宙学常数

对于确认宇宙中到底存在多少可见物质，如今我们已经比较有把握。望远镜已经无比强大，能观测到接近 130 亿光年以外的星系，而且我们可以推测出各种密度，从而对可见物质的量有一个很好的把握。正如前文所述，宇宙中大概每 5 立方米的空间中才有 1 个氢原子，仅为临界密度的 4% 。

然而，宇宙中很大一部分似乎是由暗物质所构成的。自 20 世纪 70 年代以来，越来越多的证据表明每个星系周围都围绕着一个暗物质圈。[15] 远离星系核心的恒星的运行速度与接近核心的恒星运行速度相接近；如果我们所看到的就是星系的全部质量的话，核心聚集的物质显然要比外围的多，因而那里的运行速度应该更快。从万有引力作用的角度来看，我们受到的引力作用不仅来自于我们所见到的物质。星系中的质量要比仅仅根据可见物质计算出来的数值要大。

对于暗物质究竟为何物，存在大量的推测和假说。其中既有贴近现实的（如暗物质是我们所熟悉的物体，只是不发出辐射，比如像出奇黑的石头），也有远离现实的（如超对称粒子理论设想了一类未被发现的新物质），如此等等。这些东西就留给物理学家去操心了，宇宙学家（以及那些热切期待着了解宇宙终极命运的人）所关心的是到底有多少暗物质。它们的量是否足以让 Ω 的数值大于 1，从而促使宇宙坍缩，或者相反？

如今最好的估计表明，物质（不论是可见物质、暗物质，还是什么物质）的量不足以使 Ω 的数值大于 1。然而，宇宙的密度并非只取决于物质，能量也要考虑进去。宇宙中存在大量辐射，辐射即能量，而根据爱因斯坦狭义相对论的质能公式 $E = mc^2$，可得出，$m = E/c^2$。因此，能量也要纳入 Ω 的考量范围。

最后，宇宙学常数并非真的为零（根据最新的测量，该数值为 0.7），这也会增加宇宙中物质和能量的密度。由此得出的结果显示 Ω 的数值大概在 0.98 ~ 1.1 之间，而关键的数值 1 便在该区间内。因此有一种吸引人的观点认为，我们宇宙的 Ω 的数值恰好为 1（图 21）。

Ω = 1 的有力观点

我第一次了解到 Ω 必须刚好为 1 的观点是在马丁 · 里斯于 2000 年出版的《宇宙的 6 个神奇数字》一书中。考虑到宇宙当初的膨胀速率，如果在大爆炸发生 1 秒钟之后，Ω 的数值与 1 相差 10^{-15}，那么到如今 Ω 的数值与 1 将会有显著的差别。试想想这一切有多么惊人：在宇宙大爆炸后的 1 秒钟内，Ω 的数值必须位于 0.999 999 999 999 999 和 1.000 000 000 000 001之间，其值才能维持在现在的数值范围。仅仅 6 年之后，弗兰克 · 莱文在《校正宇宙》一书中，便引用了一个激动人心的改进。他认为 Ω 的数值必须在 $1 - 10^{-52} \sim 1 + 10^{-52}$之间，才能使其数值维持在今天的范围。在此，我就不写下 52 位小数了，以免进一步激怒我的文字编辑。[16]

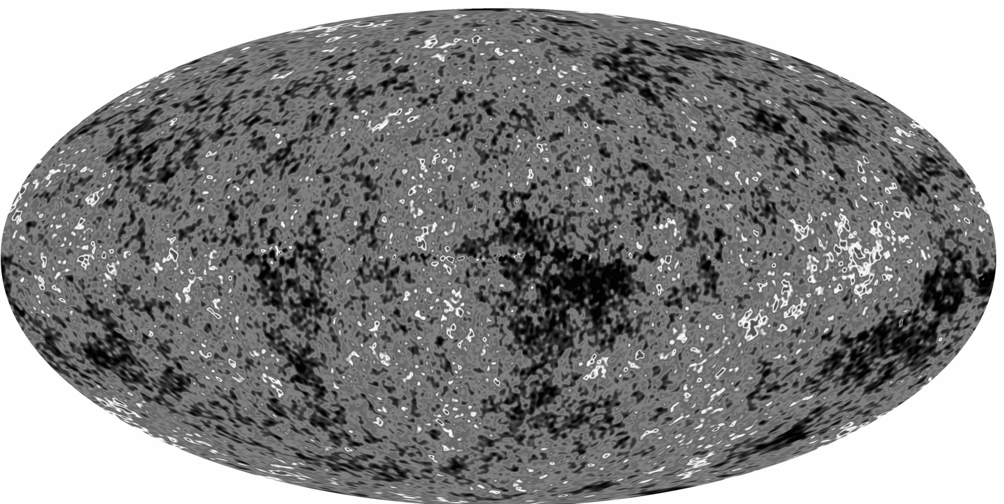


图21　威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）根据宇宙微波背景辐射的温度之间的微小差异（亮的地方温度偏高，暗的地方温度偏低，幅度约为0.0002度），绘制出“婴儿期”宇宙（38万年）最精细的照片。根据当前的宇宙模型和WMAP的测量数据，宇宙的年龄为137亿年，宇宙的组成包括4.5%的一般物质、22.7%不辐射也不吸收光线的暗物质以及72.8%导致宇宙膨胀加速的暗能量，哈勃常数为71千米每秒每百万秒差距，并且数据显示宇宙是平的（来源：NASA）

在如此宏大的尺度上进行如此微小的调整，这一切如何不使人得出 $\Omega=1$ 的结论呢？然而，虽然我们的理论或许已经可以描述出一种 Ω 的数值必须等于 1 的机制，但我们的理论无法提供一种测量手段来觉察如此微小的差别，至少目前为止是不行。不过，这也并不意外。眼下，我们只能确定一个质子的电量与一个电子的电量比为 $1-10^{-21}\sim 1+10^{-21}$ 之间。[17]获得这种程度的精确度已然是科技“魔力”的展现了，没有一位物理学家会否认这一数值等于 1，但是他们也没有一种理论能够解释为何该数值应当等于 1。我们最多只能说，几乎可以确定它就是 1。牛顿的万有引力定律和库仑定律是物理学的基础之一，但为何是与距离的平方成反比？为何指数为 2，而非一个十分接近于 2 却不完全是 2 的数呢？当然，这些定律都是在欧几里得几何学中得出的，但是数学家也已经发展出了众多非欧几何学，那么为何我们的宇宙恰恰选择了其中的这一种呢？

欧米伽是否是唯一的因素

科学界不时会有一些新发现让我不禁疑惑：“这是开什么玩笑？”比如在 1998 年，宇宙学家宣称，他们通过对 21 颗 Ia 超新星的研究[18]发现，宇宙正在膨胀。我读到这个消息，心里不禁惊讶。仅凭 21 颗超新星，他们就想完全改写宇宙论了？在统计学中，样本数少于 30 个都是不可靠的。到底发生了什么情况？

这个让我一时吃不消的结论是基于对亨丽爱塔·勒维特所发现的造父变星周光关系的进一步发展。周光关系的发现使得人们利用造父变星作为标准烛光，而在 1998 年的研究中，他们利用 Ia 超新星作为标准烛光。在理论上，Ia 超新星都以同样的机制发生爆炸，因此它们的亮度是

已知的。基于研究 21 颗相对黯淡的超新星，宇宙学家认为这一点证实了正的宇宙学常数和迄今未知的暗能量（之所以称之为“暗”，是因为我们对其一无所知）的存在，正是这些东西促使宇宙的加速膨胀。

如果这种膨胀果真存在的话，那么它将改变整个局面。如果真像宇宙学家如今认为的那样，有某种未知的能量使各个星系相互远离，那么它将完全克服掉引力作用，从而使宇宙持续膨胀，这时即使欧米伽的数值大到原本应该使宇宙坍缩也没有影响。这种宇宙的加速膨胀有一个醒目的名称，叫做“大撕裂”，在推销理论和书籍上它的效果应该都不错。

虽然这是目前最热门的理论，但它尚未得到足够的支持，还无法像相对论那样写进教材。并且该理论也有薄弱之处，比如 Ia 超新星可能并不像如今认为的那样可以作为可靠的标准烛光来使用。我不禁想起勒维特研究了 1777 颗造父变星才得出结论；我猜，如果有机会问她对该理论的看法，仅从统计学上看，她也会对此持审慎态度的。

我一直很遗憾，拉斯维加斯没有兴趣就科学理论正确与否设立赌局，不然的话，我应该能从过去三项影响颇大的科学“进展”中赢得不少赌金。虽说口说无凭，但我确实没有相信过水分子有记忆、[19]在桌面上实现冷核聚变[20]或是仅作用于中等距离的第五种基本作用力。[21]大撕裂虽然现在方兴未艾，但我总感觉什么地方不对劲。当然，另外有一个理论则很对我的胃口。

我最中意的宇宙

我的一生都在研究数学和阅读很多与科学相关的文字，我知道其中有一些科学理论是我永远也无法真正领会的。我认为，只有当你真正理

解一个深刻的理论时，你才能真正欣赏它，而我既没有相关的知识背景，也缺乏足够的钻研精神，而这两者都是理解当下的宇宙学理论所必需的素质。理查德・费曼曾经说过，如果存在一个能够解释一切事物的深刻理论无疑是妙极了，但是如果现实像洋葱一样，需要一层层拨开去逐渐探索更深的问题，那同样也很美妙。

不过后者在我看来并非同样美妙。我希望看到是一种理论能结合宇宙大爆炸理态的动态特性以及稳恒态宇宙论的永恒特性，幸运的是，此种理论已经存在了。[22]该理论将我们的宇宙视为一个多元宇宙的一部分，类似于一锅永远在沸腾的汤：不断产生新的气泡（而每个气泡就是一个宇宙的大爆炸）。气泡最终会膨胀和破裂，但这一锅汤则是永恒的。

我年轻时看了很多电视节目，其中《陆军野战医院》和《私家侦探玛格侬》是我最喜欢的两部。两部电视的大结局都曾广受瞩目，事实上，《陆军野战医院》的大结局可能是美国史上观看人数最多的一集电视。[23]但至今为止，两部剧集的大结局我都没有看。我觉得只要我没看大结局，便能继续看之前错过的几集或剧集的重播，因为大结局意味着整个故事落幕而所有角色都将曲终人散。这可能听上去有些荒唐，但我的心情确实如此。

另外，我也喜欢阅读侦探小说，但当讲述波洛侦探最后一案的《幕后凶手》[24]在作者阿加莎・克里斯蒂去世后出版时，我也出于同样的原因而始终没有去读。我把这件事告诉了我的妻子，于是她在上次我过生日的时候送了我一本《幕后凶手》。这本书现在就在我的桌子上摆着，我打算下次坐飞机的时候，就开始读这本书。如果电视重播的话，或许我也会最终把前面两部剧集的大结局看掉。

有始必有终，《陆军野战医院》如此，本书如此，作者如此，生命也如此。所有这些我都可以接受，只是唯独不能接受宇宙也有终结之日。如果宇宙能够亘古长存，那么所有美好的事物都可能延续下去，或者重头再来。

注释

[1] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/History_of_general_relativity（2011 年 1 月 26 日有效）。

[2] R. Kirshner, *The Extravagant Universe* (Princeton: Princeton University Press, 2002), 56。

[3] 可参见 http://www. physics. nyu. edu/faculty/sokal/weinberg. html（2011 年 1 月 26 日有效）。

[4] 可参见 http://mathworld. wolfram. com/EinsteinFieldEquations. html（2011 年 1 月 26 日有效）。

[5] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/De_Sitter（2011 年 1 月 26 日有效）。

[6] G. Lemaître, "Un Univers homogène de masse constante et de rayoncroissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques," *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, 47 (April 1927): 49。

[7] A. Friedmann, "Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes," *Zeitschrift für Physik*, 21, no. 1 (1924): 326 ~332。

[8] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Georges_Lemaître（2011 年 1 月 26 日有效）。

[9] 同上。

[10] 可参见 http://www. biblegateway. com/passage/? search = Genesis + 1-3&version = NIV（2011 年 1 月 26 日有效）。

[11] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Tired_light（2011 年 1 月 26 日有效）。

[12] 可参见 http://nedwww. ipac. caltech. edu/level5/Seitter/Seitter 2_3_1. html（2011 年 1 月 26 日有效）。

[13] 可参见 http://en. wikipedia. org/wiki/Steady_State_theory（2011 年 1 月 26 日有效）。

[14] 同上。

[15] 可参见 http://www. amnh. org/education/resources/rfl/web/essaybooks/cosmic/p_rubin. html

(2011 年 1 月 26 日有效)。

［16］F. Levin，*Calibrating the Cosmos*（New York：Springer，2006），201。

［17］M. Rees，*Just Six Numbers*（New York：Basic Books，2000），100。

［18］可参见 http://www.lbl.gov/supernova/（2011 年 1 月 26 日有效）。

［19］可参见 http://rationalwiki.org/wiki/Water_memory（2011 年 1 月 26 日有效）。这种理论刚一出来，我就知道是在胡扯，我简直不能相信它竟然还登上了科学界颇具声望的《自然》杂志。

［20］可参见 http://www.newenergytimes.com/v2/archives/TheyGotItWrong/Berkeley-Olander/UCBerkeley2004.shtml（2011 年 1 月 26 日有效）。我一开始读到这个消息时，内心充满了希望，因为庞斯和弗莱施曼都是令人尊敬的科学家。不过，从本质上似乎只是化学反应的过程中如何能产生核反应呢？我不禁要合手祈祷，因为如果核聚变能实用化，那么人类就将进入一个新的黄金时代。然而随着时间推移，并没有人能证实这一结果，我开始确信整个事件只是一场乌龙。其实这正是科学区别于所有其他事业的独特之处，即真理必须可以独立地进行重复。我不能说自己一听到此消息就判定出了是真是假，但在大约两周之后，我基本上已经确信此事不靠谱了。

［21］可参见 http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9781420050554.ch11（2011 年 1 月 26 日有效）。这一观点的信徒众多，但在我看来，它实在是无稽之谈。世上存在仅在极小距离内起挥作用的力，也存在随着距离的拉大而变大的力（尽管在物理学上这似乎难以令人置信，但生活中有时距离的确会产生美），但是否还存在一种仅作用于中等距离的基本作用力吗？而且它还要一直等到 20 世纪 80 年代才被人发现？这实在是太不可能了。

［22］可参见 http://www.astronomy.pomona.edu/Projects/moderncosmo/Sean's%20mutliverse.html（2011 年 1 月 26 日有效）。

［23］可参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Goodbye,_Farewell_and_Amen（2011 年 1 月 26 日有效）。

［24］A. Christie，*Curtain*（New York：Berkley Books，2000）。写完本书后，我终于读了这本书。阿加莎·克里斯蒂的书都不会让我失望，虽然这本书并非波洛系列中最精彩的一本，但同样趣味盎然。



CODATA注释

每隔四年都会有很多广受关注的事件发生，比如冬奥会、足球世界杯、中期选举等。其中引起关注较少但影响力却比体育赛事甚至中期选举更加持久的则是国际科技数据委员会（CODATA）[1]所发布的四年一度的报告。

如果有一天，该委员会的事绩被演绎为一出音乐剧，可以尝试征求罗杰斯与汉默斯坦的授权借用《飞燕金枪》的开场曲。[2]每次我阅读CODATA的报告时，脑中总会响起这个开场曲的旋律，只是歌词不一样：“CODATA数据，独一无二，只此一家，别无分店。”情况的确如此，整个科学界都要仰赖CODATA的数据以开展理论研究和实验。这些数据也代表了对于改进物理学中基本的（以及不那么基本的）常数数值的持续（很可能是无穷尽的）努力。

在本书写作期间，2010年的完整报告还没有发布。我读到的最新报告是2006年那份105页的PDF文件，这个文件可以从网站arXiv. org上下载。[3]arXiv中的x为希腊字母chi，因此arXiv的实际发音和archive（档案）一词相同。网站汇集了大量科学界的出版物和非正式出版物。而如果你只想要查看其中的几个常数，你可以去美国国家标准技术研究所的网站。[4]

你当然不会想通读整个CODATA的报告，但你需要了解其中的一些标记法以免产生困惑。在CODATA的报告中G的数值为$6.674\,28(67)\times10^{-11}$，为便于讨谈起见，我们先不管其单位。括号里的两位数叫做合成标准不确定度，当我们进行大量测量时，所得出的结果总会有一定的差异。$6.674\,28\times10^{-11}$是这些测量值的平均值，而括号里的67则是其标准差，其数值为$0.000\,67\times10^{-11}$。

一个多世纪前，X 射线尚未被发现，亚原子的世界尚未被打开，当时一些物理学家认为物理学的任务已经完结，剩下的未竟事业只是为物理学常数确定更精确的值而已。看到 CODATA 的报告，很明显，这整个拓展小数位数的事业十分繁荣兴旺。而这件事之所以值得投入如此多精力去做，我能想到至少有三个原因，当然一定还有很多我没有想到的。

首先，实用方面。可能你从没听过小行星 99942；这是一颗相当大的小行星，曾经一度，科学家判定其撞上地球的可能性大约和人们掷骰子掷到两点的几率一样。当然结果是地球并没有掷到两点，而且差得不是一点半点。如今，通过更多的观测以及更准确的 G 的数值，科学家已经将它撞上地球的可能性降到了百万分之一。更精确的 G 的数值会让我们对于小行星或彗星撞击地球的威胁有更好的认识。

其次，基础科学的进展常来自于发现现有理论中的错误。一个理论或许针对某个常数的前几位数是对的，但向后推一位后可能就会出现矛盾之处。更好的科学理论意味着更好的技术，而更好的技术则意味着更好的生活。

最后，对测量技术的改进通常意味着创造出更好的技术手段，而更好的技术能起到什么作用就不用我再重复了吧。

我不时会在阅读报纸时（我仍然会在每天早晨阅读纸质报纸），读到报道说什么地方的什么计算机又破记录地将 π 的值计算到小数点后多少位，或是一个新的最大质数被发现了。当然，这里的最大指的只是我们已知的最大。自从欧几里得以来，我们就知道世界上并不存在真正的最大质数。我认为，之所以有这些报道出来，是因为打破记录天然就具有吸引眼球的能力。然而，我却不记得有报道说普朗克常数或其他常数

的小数位数又被推进了一位。我知道此类消息可能不具备新闻价值，不过基于前面所说的三个理由以及其他更多理由，这些测量数据的改进必定会为我们的生活带来不可估量的改善。

注释

[1] 他们（Committee on Data for Science and Technology）就不能多花一丁点的时间想一个更加准确的名称缩写吗？或者将机构名称相应改为科技进步数据精确度委员会（Committee on Data Accuracy for Technological Advancement）之类的呢？或许他们觉得缩写就像是面包：有的吃总比没有强。

[2] 可参见 http://www.sing365.com/music/lyric.nsf/There's-No-Business -Like-Show-Business-lyrics-Irving-Berlin/ABA1A34F19D0E13948256970000F2FA6（2011 年 1 月 27 日有效）。

[3] 可参见 http://arxiv.org/find（2011 年 1 月 27 日有效）。这是数据库的首页，只要在“Experimental full text search”一栏键入“CODATA 2006”搜索即可。

[4] 可参见 http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html（2011 年 1 月 27 日有效）。

图灵新知系列丛书

历史上最美的10个实验

历史上最伟大的10个方程

影响数学发展的20个大问题

影响物理发展的20个大问题

影响宇宙学发展的20个大问题

如何寻找外星人？ ——35问揭示科学之美

如何破解达芬奇密码？——35问揭示数学之美

你不可不知的50个物理知识

你不可不知的50个数学知识

你不可不知的50个建筑学知识

思考的乐趣：Matrix67数学笔记

误区：思维中常犯的6个基本错误

这也能想到?——巧妙解答无厘头问题

像科学家一样思考：运用科学方法解决日常问题

身边的电子学：36个有趣的电子小实验

漫画生命史话

罗素的故事

数学与生活

怎样解题：数学竞赛攻关宝典（第2版）

数学那些事儿：思想、发现、人物和历史

数学万花筒：五光十色的数学趣题和逸事

数学万花筒2：五彩缤纷的数学问题及知识

e的故事：一个常数的传奇

三角之美：边边角角的趣事

勾股定理：悠悠4000年的故事

微积分的历程：从牛顿到勒贝格

代数的历史：人类对未知量的不舍追踪

数学沉思录：古今数学思想的发展与演变

我们大多数人都用1、2、3等数字来计数，但真正重要的数字是本书中的那13个数字！它们告诉我们为什么宇宙是我们现在见到的样子，而不是别的什么模样。读完这本富有启迪而又生动有趣的书，你就能了解为什么所有数字是平等的而一些数字比另一些更平等。

——John L. Casti，《逻辑人生：哥德尔传》、《剑桥五重奏：机器能思考吗》作者

万有引力常数、光速、理想气体常数、绝对零度、阿伏伽德罗常数、库仑常数、波兹曼常数、普朗克常数、史瓦西半径、氢聚变的效率、钱德拉塞卡极限、哈勃常数、欧米伽

通过这13个数字，我们可以一探自己所在宇宙的奥秘，它何以如此又将何去何从；

通过这13个数字，我们也可以了解人类探索宇宙奥秘的历程，众多人的牺牲与收获。

作者以定义宇宙的13个数字为线索，梳理了人类探寻这些数字的历史过程以及这些数字的物理学、化学或天文学意义。在叙述过程中，作者夹杂了个人经历、诗歌、音乐等元素，娓娓道来，使得本书成为一本科学与人文并重的有趣读物。



图灵社区：www.ituring.com.cn
新浪微博：@图灵教育 @图灵社区
反馈/投稿/推荐信箱：contact@turingbook.com
热线：(010)51095186转604
分类建议 科普读物/宇宙天文
人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn



ISBN 978-7-115-28588-1
定价：35.00元

欢迎加入

图灵社区

最前沿的IT类电子书发售平台

电子出版的时代已经来临。在许多出版界同行还在犹豫彷徨的时候，图灵社区已经采取实际行动拥抱这个出版业巨变。作为国内第一家发售电子图书的IT类出版商，图灵社区目前为读者提供两种DRM-free的阅读体验：在线阅读和PDF。

相比纸质书，电子书具有许多明显的优势。它不仅发布快，更新容易，而且尽可能采用了彩色图片（即使有的书纸质版是黑白印刷的）。读者还可以方便地进行搜索、剪贴、复制和打印。

图灵社区进一步把传统出版流程与电子书出版业务紧密结合，目前已实现作译者网上交稿、编辑网上审稿、按章发布的电子出版模式。这种新的出版模式，我们称之为“敏捷出版”，它可以让读者以较快的速度了解到国外最新技术图书的内容，弥补以往翻译版技术书“出版即过时”的缺憾。同时，敏捷出版使得作、译、编、读的交流更为方便，可以提前消灭书稿中的错误，最大程度地保证图书出版的质量。

现在购买电子书,读者将获赠书款20%的社区银子,可用于兑换纸质样书。

最方便的开放出版平台

图灵社区向读者开放在线写作功能，协助你实现自出版和开源出版的梦想。利用“合集”功能，你就能联合二三好友共同创作一部技术参考书，以免费或收费的形式提供给读者。（收费形式须经过图灵社区立项评审。）这极大地降低了出版的门槛。只要你有写作的意愿，图灵社区就能帮助你实现这个梦想。成熟的书稿，有机会入选出版计划，同时出版纸质书。

图灵社区引进出版的外文图书，都将在立项后马上在社区公布。如果你有意翻译哪本图书，欢迎你来社区申请。只要你通过试译的考验，即可签约成为图灵的译者。当然，要想成功地完成一本书的翻译工作，是需要有坚强的毅力的。

最直接的读者交流平台

在图灵社区，你可以十分方便地写作文章、提交勘误、发表评论，以各种方式与作译者、编辑人员和其他读者进行交流互动。提交勘误还能够获赠社区银子。

你可以积极参与社区经常开展的访谈、审读、评选等多种活动，赢取积分和银子，积累个人声望。

ituring.com.cn